

## 船舶における風と波の計測特性

著者	徳長 航
学位授与機関	東京商船大学
学位授与年度	2000
URL	<a href="http://id.nii.ac.jp/1342/00000855/">http://id.nii.ac.jp/1342/00000855/</a>

# 修士学位論文

## 船舶における風と波の計測特性

平成 12 年度

(2000)

東京商船大学大学院

商 船 学 研 究 科

流通情報工学専攻

徳 長 航

## 目次

### 船舶における風と波の計測特性

#### 第1章 序論

1.1 はじめに	1
1.2 風について	1
1.3 波について	1

#### 第2章 風観測および波浪計測の実態

2.1 乗組員による風の観測	3
2.2 波の観測および計測	3
2.3 気象観測および通報	4

#### 第3章 風について

3.1 乗組員による風観測値と自動計測値の比較	5
3.1.1 データの取得方法	
3.1.2 データの取得場所とデータ数	
3.1.3 全体比較、誤差頻度分布	
3.2 自動計測データによる風の特徴	6
3.2.1 風向と風速の変動	
3.2.2 見かけ風向、風速の標準偏差と(分散)と見かけ風速の関係	
3.2.3 ひずみ度、とがり度と見かけ風速の関係	
3.3 観測の読みとり誤差が及ぼす影響	7
3.3.1 見かけ風向、風速の読みとり誤差による影響	
3.3.2 観測に費やす平均時間	
3.3.3 真風向、風速の変動が見かけ風向、風速に及ぼす影響	
3.4 その他の誤差影響と計測上の問題点	10

#### 第4章 波について

4.1 シミュレーションによる出会い波浪の解析	11
4.1.1 シミュレーション波の発生方法	
4.1.2 船速合成	
4.1.3 有義波高	
4.1.4 出会い周期	
4.2 加速度計について	18
4.2.1 実験概要	

- 4.2.2 加速度比較
- 4.2.3 重力加速度補正
- 4.2.4 二回積分値(上下変位量)

## 第 5 章 考察

- 5.1 風について 21
- 5.2 波について 22
  - 5.2.1 有義波高
  - 5.2.2 出会い周期
  - 5.2.3 ジンバル機構搭載加速度計

## 第 6 章

- 6.1 風観測に際して 25
- 6.2 出会い波浪の計測に際して 25

謝辞 26

参考文献 27

図表



## 第 1 章 序論

### 1.1 はじめに

船舶において気象観測は、単に気象通報のためだけでなく、安全運航のためには欠くことのできないものである。中でも風と波の観測は、船舶運航に直接関わる要因として重要である。この研究では航行中の船舶において風と波がどのように観測および計測されているのかを調べ、それらの特性を明らかにすることを目的とした。今後、本研究の結果が風や波の情報を使用する際の参考になれば幸いである。

### 1.2 風について

船舶における風観測は、それを動力源として利用していた帆船時代から重要な観測項目として行われてきた。1805 年にイギリス海軍の Beaufort 提督が提唱した波の立ちかたから風の強さを推定する、いわゆる風力階級は測器を持たない船舶が観測する風の定量的なデータの表し方として今日なお重要な役割を果たしている<sup>(1)</sup>。ただし、日本においては 1952 年気象業務法及びその施行規則を設け、気象報告を行う一定の船舶は風向風速計を装備することとしたため、1973 年の時点でほとんど測器を持たない外国船舶に比べ日本の気象報告船舶はその 96%が測器を持つに至っており<sup>(2)</sup>、おそらく今日では 100%近い船舶が風観測の測器を装備していると思われる。このため日本船の報告する風観測データは正確であると言われているが、はたしてどの程度正確かについて船舶乗組員による観測値と自動計測値を比較することによって、それらの精度と特性について考察を試みた。

### 1.3 波について

現在用いられている船用マイクロ波式波高計の計測特性について考察を試みた。この波高計は、船舶が航行中でも絶対的な波浪高さと出会い周期を計測、表示するものである。その計測原理としては、まず船首部のアンテナからマイクロ波を発射し、アンテナと海面までの距離を計測する。それと同時に船首部に取り付けられた加速度計により船首上下加速度を計測する。その得られた船首加速度を二回積分することにより船首の上下移動量を求め、マイクロ波により得られた海面までの距離に補正することによって波浪の絶対高さを知り、表示器に数値として表示させるものである<sup>(3)</sup>。しかし、その表示波高がその時の出会い波の方向、船舶の速力や船舶の種類、また使用アンテナ等により精度が異なるという報告があった<sup>(4)</sup>。この波高計が計測する波高と周期はすべて出会い波のものであるから、同じ波でも船の針路によって表示される出会い周期が変わるのはやむを得ないが、表示される絶対波高が変わるのは本来おかしいはずである。信号処理の面から、同じ波が向波や

追い波になることによってどのように変化するのかを調べる必要がある。

そこで外洋波のスペクトルの標準形として使用される<sup>(6)</sup>Pierson-Moskowitz(以下、P-M)スペクトルを用いて風速 10m/s での波を発生させ、出会い波の方向、船速などの違いによる波形の得られ方のシミュレーションを行った。この得られたシミュレーション不規則波形からゼロアップクロス法やスペクトル解析等の方法により、有義波高や出会い周期などを計算し、それらの優位性や精度について比較解析を行った。

また、物理的に考えられる要因として、波高計を構成する機器の設置方法や設置場所、使用しているアンテナ特性、加速度計の精度などが挙げられる。ここでは加速度計の出力について注目し、実船実験において使用加速度計の設置方法の違いによる加速度計の出力値の比較や二回積分値(上下変位量)などの比較を行い、今後の船用波高計ユニットを改良する際の解析を試みた。

## 第2章 風観測および波浪計測の実態

### 2.1 乗組員による風の観測

船舶が装備している風向風速計には多くの機種があるが、一般に船体に当たる気流の瞬間値としての風向と風速を表示する測器が大部分である。この種の風向風速計には航走する船舶の風に対する相対針路と速力の影響が含まれている。そこでこのような風を「見かけ風向」、「見かけ風速」と呼ぶが、見かけ風向は一般に船の船首方向を基準(0度)とし左右に船尾へ±180度までの数値で表す。これに対して、船の針路、速力の影響を取り除き地球座標の固定点に吹いたものとして表した風をここでは「真風向」、「真風速」と呼び、一般に北を0度とする360度方式で表す。なお、船舶にとっては船体にはたらく相対的な風向が問題になることが多いため、ここでは船の針路、速力の影響を含まない真風向の別な表し方として、船の船首方向を基準として左右に船尾へ±180度まで設定する船体座標軸で表す風向を特に「船体真風向」と呼ぶことにする。

風は時々刻々と変化しているが、観測時間において持続性がよく実用上便利である<sup>(6)</sup>ため観測時刻前10分間の平均風を持って観測時の風と呼んでいる。ただし、船舶気象観測指針においては1分間の示度の平均は10分間の平均風とほぼ一致する<sup>(7)</sup>とし、現在も風観測の方法として、自記器を備えている場合には観測時の10分前からの変動の記録を見て平均値を判断し、自記器を備えていない場合には約1分間の指針の振れを見て平均値を読みとることになっている<sup>(8)</sup>。しかしながら一般船舶が自記器を備えていることは“まれ”であり、ほとんどの船舶では指示器の値を10秒程度の短い時間で読みとっているのが現状と思われる。すなわち、誤差要因を含む手順に分解すると、①定められた観測時刻の数分前、②風向風速計の指示値を10秒程度、③見かけ風向、見かけ風速の平均を目で読みとり、④船速と針路を加味してベクトル計算を行い真風向、真風速を算出して、⑤風向は10度単位、風速は1k't(ノット:1k't=1852m/h)単位で報告しているのが実態であり一般的な方法である。

### 2.2 波の観測および計測

波の観測は主に気象通報の際に行われる。気象観測表での波に関する項目は、風浪高さ・周期、波浪高さ・周期、うねり高さ・周期・方向である。高さは0.5m単位、周期は1秒単位、方向は10度単位で記入する。風浪とうねりは乗組員が目視観測を行い、その結果を記入することになっている。また、うねりは同時に幾つかの方向からやって来る場合があるため、その時は、うねりの中でも一番大きな波高のものを“うねり1”、その次に大きなものを“うねり2”に記入することになっている。しかしながら夜間などで風浪やうねりを観測することができない場合が多く、本研究において気象通報データの取得を依頼した船舶では、極端に観測データが少ないこともあった。また、観測者の波観測の熟練

度も大きく関わってくと思われる。波浪については波高計を装備している場合は、波高計による測器観測値(表示値)を記入する。波高計の計測原理は第 1 章、第 3 節(1.3)で述べたとおりであり、記入される値は絶対的な高さと出会い周期である。

## 2.3 気象観測および通報

本章第 1 節および第 2 節でも触れたが、日本では遠洋区域を航行するほとんどの船舶に対して、必要な気象観測測器を備えつけ、それによる観測の実施やその成果の報告が義務づけられている。気象観測を行う時間は、毎日 00、03、06、09、12、15、18、21UTC に行う。日本の気象庁に対しては東経 115° から東経 170°、北緯 10° 以北の海域においては上記の観測時刻の気象観測成果を電報により報告する。東経 100° から西経 160°、北緯 10° から北緯 60° の海域においても同様の時刻に観測するが、気象観測成果を電報により報告するのは、00、06、12、18UTC だけでよい。それ以外の海域においても、00、06、12、18UTC の観測、通報が求められている。観測、通報する内容は表 2.1 に示すとおり多項目に及ぶ。なお、その中でも気圧の観測は必ず正時に行うことになっている。

しかしながら前節でも述べたように、気象通報データが少ないのが現状のようである<sup>(1)</sup>。気象観測測器は備えており、船舶独自の観測はしていると思われるが、いざ気象観測表を作成し、その成果を通報しようとなるとその項目数の多さ、手間と時間から 3 時間ないし 6 時間毎に作成、報告するのはかなり煩雑であり、難しいと思われる。

## 第3章 風について

### 3.1 乗組員による風観測値と自動計測値の比較

#### 3.1.1 データの取得方法

船舶における風の計測特性を考えるにあたり、乗組員による風観測値と自動計測値を用いた。乗組員による風観測値は、北太平洋を航行する二隻の定期コンテナ船において気象通報のために作成される気象観測表から引用して用いた。それに対して自動計測値は、上記のコンテナ船に取り付けた自動航行記録装置により、気象通報とほぼ同時刻に自動計測された値を用いた。自動航行記録装置では、波浪、風向、風速、船体運動等を計測している。自動航行記録装置とは、波高計、風向風速計、船首加速度計、姿勢計測装置、GPSと記録用のパソコンから構成されており、記録される時間は毎時正時から10分間で、0.5秒毎に1,200個のデータが記録される。GPSにより計測開始のポジションと計測終了のポジションが得られ、平均中分緯度航法により針路と速力が算出される。風については10分間の見かけ風向、見かけ風速の平均と得られた針路、速力により真風向と真風速を算出し、見かけ風と真風の両方が記録される。表3.1に上記二隻のコンテナ船の要目を示す。

#### 3.1.2 データの取得場所とデータ数

乗組員による観測値と自動計測値の比較においては同時に得られた時のデータ1,637個(1993年3月から1996年2月)を使用した。データ取得海域は図3.1に示すとおりである。見かけ風向、風速の標準偏差等に使用したデータは全ての航行海域における1時間毎の自動計測データ16,500個を用いた。

#### 3.1.3 全体比較、誤差頻度分布

乗組員による観測値と自動計測値の全体比較や分布、誤差頻度分布は次のようになっている。図3.2は乗組員による観測値と自動計測値の真風向別取得データ数の頻度グラフである。上段が乗組員による観測値、下段が自動計測値で、半径方向は頻度である。観測値、計測値とも西よりの風が多いが、方位によっては差が見られる。乗組員による観測値は風向が10度単位で報告されるが、自動計測値の風向は小数点第1位まで計測される。図3.3は乗組員による観測値と自動計測値の風速別取得データ数の頻度グラフである。縦軸は頻度、横軸は風速(m/s)である。乗組員による観測値は風力(k't)で報告されているため風速(m/s)に変換した。ほぼ同じような分布であるが、若干自動計測値の方が風速を大きく示す傾向がある。また、自動計測値は分布が滑らかであるのに対し、乗組員による観測値は凸凹が目立つ。図3.4は乗組員による真風向観測値と自動計測による真風向観測値の差をとった風向差の頻度グラフである。縦軸は頻度、横軸は風向差(度)の絶対値である。約85%が±30度以内に収まっている。しかし、かなり大きな風向差も現れている。乗組員による観測値が「静穏」のものは、その時の風向差は0度とした。図3.5は乗組員による真風速観測値と自動計測による真風速観測値の差をとった風速差の頻度グラフである。縦軸は頻

度、横軸は風速差(m/s)の絶対値である。約 84%が±3m/s 以下に収まっているが、一部にかなり大きな風速差が現れている。また、図 3.6 は見かけ風速 2m/s 毎の平均風向差と平均風速差を表したものである。左縦軸は平均風向差(度)、右縦軸は平均風速差(m/s)、横軸は見かけ風速(m/s)である。見かけ風速が大きくなると風速差は大きくなる。風向差は見かけ風速が 10~18m/s のときに大きくなり、それ以外の風速では 28m/s を除いて小さくなっている。図 3.7 は計測真風速 2m/s 毎の平均風向差と平均風速差を表したものである。左縦軸は平均風向差(度)、右縦軸は平均風速差(m/s)、横軸は計測真風速(m/s)である。計測真風速が大きくなると観測数の少ない 26m/s のデータを除き風速差は大きくなり、風向差は逆の傾向を示す。

## 3.2 自動計測データによる風の特性

### 3.2.1 風向と風速の変動

図 3.8 は 10 分間の見かけ風の時系列の一例(1999/05/25 01:00 UTC)である。上段が見かけ風向(度)、下段が見かけ風速(m/s)である。この時の見かけ風向の平均は -35 度、変動の標準偏差は 18.4 度であり、見かけ風速の平均は 5.7m/s、変動の標準偏差は 1.8m/s であった。この図から 10 分間の風向、風速にはこれだけの変動を持つ場合があるにもかかわらず、僅か 10 秒程度の指示値をどの時点で読むかによって観測値はかなり異なってくるのがわかる。

### 3.2.2 見かけ風向、風速の標準偏差と見かけ風速の関係

図 3.9 は全計測データ毎の見かけ風速とその時の見かけ風向変動標準偏差の関係を表したものである。縦軸は見かけ風向の変動標準偏差(度)、横軸は見かけ風速(m/s)である。見かけ風速が小さい場合、見かけ風向の標準偏差が大きくなっている。また、図 3.10 は見かけ風速とその時の見かけ風速変動標準偏差の関係を表したものである。縦軸は見かけ風速の変動標準偏差(m/s)、横軸は見かけ風速(m/s)である。見かけ風速が大きくなると見かけ風速の標準偏差は大きくなる。しかし見かけ風速が小さくても標準偏差が大きい場合もあることから、真風速自体が変動している場合があることを現している。つまり図 3.7 と合わせて考えると真風は、真風速が小さくなると風速の変動は小さくなるが、風向の変動が大きくなる。そして真風速が大きくなると風向の変動は小さくなるが、風速の変動が大きくなると言える。

### 3.2.3 ひずみ度、とがり度と見かけ風速の関係

図 3.11 は同じく全データ毎の見かけ風速とその時のひずみ度の関係を表したものである。縦軸はひずみ度、横軸は見かけ風速(m/s)である。ひずみ度  $Sk$  とは、

$$Sk = \frac{\mu_3}{(\mu_2)^{\frac{3}{2}}} \quad (3.1)$$

$$\text{ただし、} \mu_m = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (x_j - \bar{x})^m \quad (3.2)$$

$\bar{x}$  : データ平均値、 $N$  : データ総個数

で算出され、10 分間における風速変動が平均値（平均風速）回りに正規分布していれば 0 の値を示し、分布のピークが平均値より小さい方に寄っていれば負を、大きい方に寄っていれば正の値を示す。すなわち正規分布に比した分布特性を示す指標である。この図によれば見かけ風速が大きくなるとひずみ度はマイナス方向に偏ってくることから平均風速が大きい場合には瞬間的な強風、すなわち“風の息”が卓越してくることを示している。また、図 3.12 は見かけ風速とその時のとがり度の関係を表したものである。縦軸はとがり度、横軸は見かけ風速(m/s)である。とがり度  $Kr$  とは、

$$Kr = \frac{\mu_4}{(\mu_2)^2} \quad (3.3)$$

で算出され、とがり度とは変動の分布が正規分布の場合には 3 の値を示し、平均近くの変動が多い（変動幅が狭い）場合には 3 以上の値を、変動幅が広い場合には 3 以下の値を示すという、分布特性を表す指標の一つである。見かけ風速が 10～20m/s の時、とがり度は大きくなるデータが現れてくる。このデータを調べた結果、真風速が弱く見かけ風向が船首方向の時のものであった。見かけ風速が 20m/s 以上に大きくなると変動は大きくなるので、とがり度は大きくならないことは図 3.10 でも明らかである。

### 3.3 観測の読みとり誤差が及ぼす影響

#### 3.3.1 見かけ風向、風速の読みとり誤差による影響

ここでは「第 2 章、第 1 節の③の誤差要因」に関して、見かけ風向、風速の読みとり誤差がベクトル計算後の真風向にどのように影響するのかを見積もってみた。船速を 20k't、真風速、真風向はわかっているものとした。図 3.13(a)と(b)は見かけ風向のみを読み違えた場合の風向誤差の見積もり結果である。それぞれ真風速が 10m/s (図 3.13(a))、5m/s (図 3.13(b)) の場合であり、黒○印が見かけ風向を+5 度、赤×印が見かけ風向を+10 度それぞれ読み違えた場合のものである。各真風向に対する風向誤差の大きさを半径方向の距離に表した。プロットは船体真風向 3 度ずつずらした場合の結果である。見かけ風向の読みとり誤差は主に船体真風向が前方からの時、ベクトル計算誤差を大きくさせる。

り誤差は主に船体真風向が前方からの時、ベクトル計算誤差を大きくさせる。

また、図 3.14(a)と(b)は見かけ風速のみを読み違えた場合の風向誤差の見積もり結果である。それぞれ真風速が 10m/s (図 3.14(a))、5m/s (図 3.14(b)) の場合であり、黒○印が見かけ風速を+1m/s、赤×印が見かけ風速を+2m/s それぞれ読み違えた場合のものである。各真風向に対する風向誤差の大きさを半径方向の距離に表した。プロットは船体真風向 3 度ずつずらした場合の結果である。見かけ風速の読みとり誤差は主に船体真風向が斜め後方からの時、ベクトル計算誤差を大きくさせる。

さらに、図 3.15(a)と(b)は見かけ風向と風速を同時に読み違えた場合の風向誤差の見積もり結果である。それぞれ真風速が 10m/s (図 3.15(a))、5m/s (図 3.15(b)) の場合であり、黒○印が見かけ風向を+5 度と見かけ風速を+1m/s、赤×印が見かけ風向を+10 度と見かけ風速を+1m/s それぞれ読み違えた場合のものである。同様に各真風向に対する風向誤差の大きさを半径方向の距離に表した。プロットは船体真風向 3 度ずつずらした場合の結果である。見かけ風向、風速の同時に読みとり誤差が同時に存在することは非常に大きな誤差となって現れる。また、いずれの場合も真風速が 5m/s 時の方が誤差が大きく現れることから、真風速が弱いときほど見かけ風向風速の観測は慎重に行わなければならないことが分かる。

### 3.3.2 観測に費やす平均時間

図 3.16 は平均時間による風速の持続性を表したものとして知られている図<sup>(6)</sup>である。縦軸は相関係数、横軸は平均時間に応じた時間(秒)である。 $T$  は観測に費やす平均時間(秒)を表し、その平均時間  $T$  の  $n$  倍過ぎた時刻における平均風速と、 $n=0$  での平均風速との相関関係を表している。10 分間( $T=600\text{sec.}$ )の平均風速は持続性がよく実用上便利であることがわかる。

そこで例として見かけ風向、風速の両方の変動標準偏差が小さい時と変動標準偏差が大きい時の 10 分間の生データ(1,200 個)から平均時間 (1 秒、10 秒、30 秒、60 秒、100 秒) 毎による見かけ風向、風速の平均値分布を比較した。ここで使用した標準偏差が小さい時の 10 分間の時系列(1994/11/28 09:00 UTC)を図 3.17 に示す。この時の平均風速見かけ風向の平均は 13.1 度、変動の標準偏差は 2.9 度であり、見かけ風速の平均は 13.7m/s、変動の標準偏差は 0.5m/s である。また、標準偏差が大きいときの 10 分の時系列(1996/02/10 13:00 UTC)を図 3.18 に示す。この時の平均風速見かけ風向の平均は -87.6 度、変動の標準偏差は 20.8 度であり、見かけ風速の平均は 6.76m/s、変動の標準偏差は 2.3m/s である。いずれも上段が見かけ風向(度)、下段が見かけ風速(m/s)である。これらのデータを用いて先の平均時間毎に平均値の分布をグラフ化したものが図 3.19 と図 3.20 である。それぞれ縦軸は頻度割合、横軸は上段が平均風向から変位量(度)、下段が平均風速からの変位量(m/s)をあらわす。例えば、平均時間を 30 秒とした場合、10 分間のデータの中から 0.5 秒毎にずらしながら 30 秒間のデータ平均を求め、各 30 秒間平均値の分布を示した図である。変動標準偏差の小さい図 3.19 において、もし 30 秒以上の平均を取るならば、10 分間のどこで 30 秒間の平均を取り出しても見かけ風向、風速とも全区間(10 分間)平均とほぼ一



致している。同様に標準偏差の大きい図 3.20 において、もし 100 秒平均を取るならば、10 分間の中でどこで 100 秒間の平均を取り出しても全区間(10 分間)平均に対して見かけ風向は±約 10 度以内、見かけ風速も±約 1m/s 以内に収まっている。このことから標準偏差が小さい場合でも最低 30 秒以上の観測・平均が望ましく、標準偏差が大きい場合は気象観測指針にあるとおり、60 秒以上できれば 100 秒以上の観測・平均が望ましいことが分かる。

### 3.3.3 真風向、風速の変動が見かけ風向、風速に及ぼす影響

前項でも述べたように見かけ風向、風速の変動が小さければ読みとり時間が短くても比較的正しい(平均風の)値を読みとることができる。この見かけ風向、風速の変動は真風向、真風速が変動しているために起こるものだが、真風向、真風速の変動量と見かけ風向、風速の変動量は同じではなく、船速と船体真風向、風速の関係によって異なる。そこで真風向、真風速の変動が見かけ風向、風速にどのように現れるかを見積もってみた。

図 3.21 は真風速として変動はないが真風向が標準偏差 10 度で変動している場合、速力 20k<sub>t</sub> の航走船舶が受けるであろう見かけ風向と風速の変動の大きさ(標準偏差)を真風速が 5m/s、10m/s、15m/s 毎に示したものである。点線は見かけ風速の変動標準偏差、実線は見かけ風向の変動標準偏差を示す。図は平均船体真風向毎に標準偏差 10 度で 10 分間(1,200 個)の正規乱数(0.5 秒ごとの船体真風向瞬間値)を発生させ、それぞれの船体真風向瞬間値と図中に記したそれぞれの一定真風速から算出した瞬間値としての見かけ風向、風速 10 分間(1,200 個)分から、その変動標準偏差を求めたものである。図の左縦軸は見かけ風向の変動標準偏差、右縦軸は見かけ風速の変動標準偏差、横軸は船体真風向の平均値を表している。図によれば真風速には無い風速変動が見かけ風速に現れており、向かい風の場合にはその変動は小さいが、船体真風向が後ろに回るほど変動は大きくなる。特に船体真風向が船尾クォーター付近の場合にはかなり大きな見かけ風速の変動となって現れるが、船体真後方向で変動は減少する。また、風向変動に関しては船体真風向が船首から後方 120 度付近までは真風向の変動(偏差 10 度)より小さな変動でしか現れない。ただし、船首より 150 度以上後方からの風に対しては急に大きな変動を示すようになり、当然のことながら特に船速とほぼ等しい真風速を持つ追い風の風向変動は極端に大きくなることがわかる。

また、図 3.22 は前記の風とは逆に真風向の変動はないが、真風速が(平均風速の違いに関わらず)標準偏差 2m/s で変動している場合、速力 20k<sub>t</sub> の航走船舶が受けるであろう見かけ風向と風速の変動の大きさ(標準偏差)を真風速が 5m/s、10m/s、15m/s 毎に示したものである。点線は見かけ風速の変動標準偏差、実線は見かけ風向の変動標準偏差を示す。図によれば追い風になるに従って真風向にはない風向変動が大きく現れるようになり、平均真風速が船速と同じ程度になる追い風で見かけ風向が非常に大きな変動を示す。見かけ風速の変動は風向が船首方向または正船尾方向の場合には元の真風速の変動と大体同程度の変動を示すが、それ以外の風向に対しては真風速の変動以下となり、船体真風向が船尾斜め方向の時に最も小さくなる。

以上のことより、一般に風を斜め後方から船尾方向にかけて受ける追い風の範囲では真

風向、風速の変動が増幅して現れ、見かけ風向、風速は大きく変動することになる。このため風観測指示器の読みとりに際してはより慎重な(時間をかけた)読みとりが必要である。

### 3.4 その他の誤差影響と計測上の問題点

見かけ風から真風を算定するに当たっての誤差要因としては他にもいくつかが考えられる。その一つは風向風速計指示器からの読みとり誤差と同じく、見かけ風から真風を算出するために必要な船速と針路の指示器からの読みとり誤差である。航走中の船舶は船速、針路共に変動しており特に荒天の場合にその変動は大きくなる。従って、速力、針路の読みとりに当たっても慎重な読みとりが必要である。

そして、「第2章、第1節の④の誤差要因」で述べたベクトル計算誤差も考えられる。データを子細に点検すると明らかな計算誤差と思われるような不合理なデータが散見されている。見かけ風向、見かけ風速そして船速、針路によるベクトル計算用円盤(風向風速計算盤)が多く用いられているが、十分な習熟を行ってから使いこなす必要がある。

また、正しく真風を算出した後の報告段階の誤差も考えられる。その一つが「第2章、第1節の⑤の誤差要因」で述べた報告値の丸め誤差である。すなわち風向は10度単位で報告するため最大±5度の誤差が生じる可能性があり、風速は1k<sub>t</sub>単位で報告するため最大±0.5k<sub>t</sub>の誤差が生じる可能性がある。

さらに、これは乗組員による風観測の特性ではなく、船舶での風の計測を考えた場合の特性であるが、風の計測高さは大きく関わってくる。WMOの取り決めでは風速の観測標準高さは海面上10mとされている。しかし、なるべく船体影響の少ない所という意味で一般にはマストの上など、高い場所に風向風速計が設置されている。このため船の大小、種類によって設置高さが大きく異なっている。図3.23は1973年における船舶気象報告を行った船の設置高さを示したものである<sup>(2)</sup>。縦軸は割合(%)、横軸は設置高さ(m)である。図によれば最頻値は25~30m、最高50m以上にも達している。風の高さ影響としては一般に風向は接地摩擦の影響から高度が高いほど北半球では右に変位する。そして接地気層内の風速高度分布として高さの「べき法則」が知られており、当然のことながら高度が高いほど風速は大きくなる。気層が中立の時の概略算定式として知られている「風速は高度の1/7乗に比例する」を用いれば高度10mの標準高度の風に対し高度25mでは14%増し、高度50mでは26%増しもの風速が生じていることになる。本報告におけるデータ取得船舶の風向風速計の高度は42mであるところから23%程度の過大風速を報告していることが考えられる。これらの高度影響による変化量は無視できるほど小さくはなく、気圧の観測で行われている海面更正と同様に、風の標準高度への更正が是非必要と思われる。

## 第4章 波について

### 4.1 シミュレーションによる出会い波浪の解析

成分波の波高や周期のはっきりとした不規則波浪下での出会い波浪実験を造波水槽において行うことは困難であるため、ここでは数値シミュレーションを行うことにより航走する船舶が会うはずの本来の信号として得られるであろう波高と周期について解析した。

#### 4.1.1 シミュレーション波の発生方法

外洋の風成波発生域内で十分に発達した風波スペクトルとかなりよい一致を示している P-M スペクトルを用い、風速  $U=10m/s$  での波浪を計算機内で発生させた。P-M スペクトルとは、停船しながら海洋波を計測し、北大西洋上で数年にわたり取得したデータから、十分に発達し吹送距離には無関係になったと考えられるデータを風速別に分類して解析したもの<sup>(6)</sup>であり、その P-M スペクトル  $\phi(f)$  は、

$$\phi(f) = k_1 f^{-5} \exp(-k_2 f^{-4}) \quad (4.1)$$

$$k_1 = 8.1 \times 10^{-3} (2\pi)^{-4} g^2 \quad (4.2)$$

$$k_2 = 0.74 \left( \frac{g}{2\pi U} \right)^4 \quad (4.3)$$

のように表される。ここで  $g$  は地球重力加速度 ( $g = 9.8m/s^2$ ) である。本来の P-M スペクトルの風速は  $U_{19.5}$  であり、これは海面上 19.5m における風速である。今回のシミュレーションの場合は単に外洋での波形を得るために用いたので、 $U_{19.5} = 10m/s$  としてシミュレーションを行った。上記 P-M スペクトルから時系列波形  $\eta$  を得るには、風速  $U$  に対応する P-M スペクトルのピーク周波数から高周波側、低周波側共にパワーがピーク値の 1000 分の 1 を示すまでの周波数を 0.001Hz ごとに分割し、それぞれの分割領域周波数に対する成分波を作る。シミュレーションにおけるピーク周波数は 0.137Hz であり、最低周波数は 0.080Hz、最高周波数は 0.699Hz であった。周波数間隔は 0.001Hz であるから合計 620 個の成分波を作ったことになる。一つずつの成分波  $\eta_n$  は、

$$\eta_n(t) = a_n \sin(2\pi f_n t) \quad (4.4)$$

のようにして作る。ここで  $n$  は周波数分割領域における  $n$  番目の区分を示す。P-M スペク

トルの全スペクトルエネルギーは、負の周波数部分を折り返したワンサイドスペクトル (One Side Spectrum)を表したものであることから、成分波の片振幅  $a_n$  は、

$$a_n = \sqrt{2\phi(f_n) \times \Delta f} \quad (4.5)$$

と表される。ここで  $\Delta f$  は周波数分割幅(本シミュレーションにおいては **0.001Hz**)である。

この成分波をランダムな位相差  $\varepsilon_n$  を用いて、

$$\eta(t) = \sum_1^N a_n \sin(2\pi f_n t + \varepsilon_n) \quad (4.6)$$

のようにランダムに合成させることにより不規則波の時系列  $\eta(t)$  を得る。この不規則波時系列は海面の固定点で計測した時に得られるであろう波形を示しており、ここでは原波浪と呼ぶことにする。(4.6)式における重ね合わせ数  $N$  は、**0.001Hz** 毎に作った成分波の数 **620** である。シミュレーション波としては上記の時系列波形  $\eta(t)$  を用い、サンプリングタイム **0.1** 秒ごとに抽出点数を  $2^{14}$  個に相当する **16,384** 点、すなわち発生時間は **27.3** 分に設定した。この原波浪に航行船の針路に応じた速力を加えることにより、波形の変化、算出される有義波高、出会い周期の変化を解析した。

#### 4.1.2 船速合成

先に発生させた原波浪に向波と追い波それぞれにつき、船速を合成させて、向波と追い波での波形を得る。合成の方法としては、まず原波浪の各成分波毎の波速  $C_n$  (m/s)をそれぞれの成分周波数  $f_n$  を用いて、

$$C_n = \frac{g}{2\pi f_n} \quad (4.7)$$

により求め、船速  $v$  (m/s)の船舶が出会うであろう出会い成分波の周波数  $f_{En}$  をドップラー効果の次式、

$$f_{En} = f_n \left| \frac{C_n - v \cos \theta}{C_n} \right| \quad (4.8)$$

により新たに求める。ただし、 $\theta$  は船首方向と波の進行方向との角度差である。船速と波向きによっては、出会い成分波の周波数が計算上、負になる場合があるが、物理的に負の周波数はないため絶対値をとるものである。この各出会い成分波の周波数を用いて、上記(4.4)式と同様にそれぞれの出会い周波数毎の成分波  $\eta_{En}$  を

$$\eta_{En}(t) = a_n \sin(2\pi f_{En} t) \quad (4.9)$$

のようにして作り、それを再び上記(4.6)式と同様に合成した、

$$\eta_E(t) = \sum_1^N a_n \sin(2\pi f_{En} t + \varepsilon_n) \quad (4.10)$$

が求める出会い不規則波浪となる。横波では船速を合成しても(4.8)式の  $\cos \theta$  の値が 0 になるので船速の影響は受けず、周波数の変化は起こらないで原波浪の波形データと同じ形になる。航行中の船舶が向波と追い波の得られるであろう、それぞれの船速に対する波形の一例を 2k't から順に 24k't までそれぞれ図 4.1(a)、(b)から図 4.12(a)、(b)に示す。同じ船速に対して(a)が向波(赤色)、(b)が追い波(緑色)である。図 4.13 は船速の影響を受けない横波(黄色)の図である。ただし、それぞれの図において最上段の図は、出会い波浪の時系列データ  $\eta_E(t)$  からフーリエ変換を行って求めた出会い波浪スペクトル(色付き線)と原波浪の P-M スペクトル(黒線)で、縦軸が周波数スペクトル、横軸が周波数である。水平(周波数)軸上の丸印の点は出会い波浪スペクトルのピーク周波数を示している。中段の図は出会い波浪の波形  $\eta_E(t)$  (色付き線)と実時間表示の有義波高(+側の黒点線)を表した時系列で、縦軸は波高(m)である。実時間表示の有義波高(以下、表示有義波高)とは、波高計表示器において時々刻々と表示される波高で、それまでの波高から現時点での有義波高が推定計算される。青色の縦線はスタートから時刻 6 分目の位置を示しており、これ以後を定常状態として後述の統計計算に使用した。最下段の図はゼロアップクロス法によるゼロアップクロス点での出会い周期の変化(色付き線)とそれを加味した実時間表示の出会い周期(黒線)を表した時系列で、縦軸は周期(秒)である。実時間表示の出会い周期(以下、表示出会い周期)とは、先の実時間表示の有義波高と同様に波高計表示器において時々刻々と表示される出会い周期を表している。

#### 4.1.3 有義波高

今回の解析では有義波高  $H_s$  を次の 3 種類の方法で求めた。一つ目は、原波浪の有義波高算出に用いられているゼロアップクロス法による 1/3 最大波高である。まず、ゼロアップクロス法は平均水面に対して波形の値がマイナスからプラスになる交点をゼロアップクロス点とする。そして一つのゼロアップクロス点から次のゼロアップクロス点までを一波として波形を取り扱う。この一波の時間間隔を周期、その一波における最大値と最小値の差を波高と定義する方法である。そしてゼロアップクロス法により得られた全波高の中で大きい方から三分の一の数の波高を取り出して平均した値を 1/3 最大波高  $H_{1/3}$  と定義する。

二つ目は、得られた出会い波形をフーリエ変換して再びスペクトルで表し、その全スペクトルエネルギー(波形の分散に等しい値となる)から換算して求める有義波高(以下、スペクトル有義波高)であり、波の全スペクトルエネルギーを  $m_0$  とすると、

$$H_s = 4.004 \sqrt{m_0} \quad (4.11)$$

$$\text{ただし、} m_0 = \int_0^\infty \phi(f) df \quad (4.12)$$

の統計的関係式<sup>(9)</sup>から得られるものである。

三つ目は、表示有義波高である。波高計の表示器に示されているもので、先の二つのように一定時間の観測した後の統計計算によって得られる有義波高と異なり、この表示有義波高は時々刻々と変化するそれまでの波高から有義波高が推定計算され、リアルタイムに表示するものである。表示有義波高はコンデンサと抵抗の簡単な組み合わせによる電氣的平均回路で構成表示されるが、それを数式化すれば、

$$H_s = 10 \overline{\eta}_{>0} \quad (4.13)$$

$$\text{ただし、} \overline{\eta}_{>0} = \frac{1}{\tau} \int_{-T}^0 \eta_{>0}(t) \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) dt \quad (4.14)$$

$\eta_{>0}$  : 波形データの正の部分

$\overline{\eta}_{>0}$  :  $\eta_{>0}$  の平均

$\tau$  : 時定数

$T$  : 平均時間

により得られる有義波高である<sup>(10)</sup>。時定数は平均時間の半分程度にすることにより、実用

上十分な精度で有義波高を表示させる<sup>(11)</sup>ので、今回は  $T=6$  分、 $\tau=3$  分とした。つまり、現時点からさかのぼって 6 分間の波形データを考慮して、現時点の波高が算出されることになる。また、先の二つの有義波高と異なり一連のシミュレーション波形に対し、一つの有義波高値が算出されるわけでない。よって統計的に処理するために、スタート後 6 分以降の定常状態になった時点から残りの 21.3 分間の表示有義波高の平均を持ってその一連の波形データを代表する表示有義波高とし、同時にその標準偏差(以下、表示有義波高の標準偏差)を求めた。

そして、ランダムに合成してつくられた一連のシミュレーション波形に対し、この 3 種類の有義波高と標準偏差を計算させる動作を一つの船速に対して、向波、追い波、横波につきそれぞれ異なった出会い波浪の波形で 300 回ずつ行った。その平均を表 4.1 に示す。その計算と同時に、ゼロアップクロス法による平均波高と波の数も求め、同表に示してある。

図 4.14 に波向き別のゼロアップクロス法による 1/3 最大波高のグラフを示す。縦軸は波高(m)、横軸は船速(k't)である。図によれば、向波については船速が増すにつれて僅かながら直線的な減少傾向が見られる。追い波では船に追い越されるような成分の波が増えだす 12k't あたりから極端に有義波高が小さくなり始めるが、全体を通して減少傾向があるのではなく、値としては船速が 8k't 付近でやや大きめの値を示すが、その後船速の増加と共に小さくなり、20k't 付近で最小となっている。

図 4.15 に(4.11)式で定義した波向き別の出会い波浪スペクトルからの換算有義波高のグラフを示す。縦軸は波高(m)、横軸は船速(k't)である。上記の P-M スペクトルの (4.1)式と全スペクトルエネルギーの (4.11) 式より有義波高  $H_s$  と風速の関係は、

$$H_s = 0.0213 \times U^2 \quad (4.15)$$

$U$  : 風速(m/s)

のように求まる<sup>(12)</sup>。シミュレーションにおいては風速を  $U=10\text{m/s}$  に設定したため、(4.15)式による有義波高は 2.13m になるはずであるが、図 4.15 の結果は船速の影響、波の向きに関わらず、非常によく一致しているのがわかる。また、いずれの波向きにおいてもスペクトル有義波高は図 4.14 に示したゼロアップクロス法による 1/3 最大波高に比べて全体的にやや大きめに示している。このことは(4.11)式において、有義波高  $H_s$  を求める係数は 4.004 ではなく、3.8 の方がよく合うという説<sup>(9)</sup>を支持している。

図 4.16 に波向き別の表示有義波高のグラフを示す。図によれば、追い波において船速が増すにつれ僅かな増加傾向が見られるが、向波、横波においても船速による変化、波向きによる変化はほとんど無い。また、いずれの波向きにおいても図 4.14 に示したゼロアップクロス法による 1/3 最大波高や図 4.15 に示したスペクトル有義波高やよりも小さな有義波高を示している。このことは(4.13)式における係数が(4.11)式をもとに求められている<sup>(10)</sup>

ことから当然の結果と言える。したがってゼロアップクロス法による有義波高に合わせるためには係数を 10 ではなく、1 割程度大きくすべきことを示している。

図 4.17 に表示有義波高の標準偏差のグラフを示すが、船速が増すにつれ、追い波の標準偏差は大きく増加するが、向波は若干減少する傾向がある。

#### 4.1.4 出会い周期

出会い周期においても有義波高と同様に 3 種類の方法で求めた。一つ目はゼロアップクロス法による周期である。ここでは、ゼロアップクロス法により得られた、1/3 最大波の出会い周期の平均(以下、有義波出会い周期)とすべての出会い周期の平均(以下、平均出会い周期)の両方を求めた。

二つ目はスペクトルピークからの周期(以下、スペクトルピーク出会い周期)である。前項で述べたように出会い波形からフーリエ変換してスペクトルを平滑化し、最もパワーの強い周波数、つまりピーク周波数の逆数から得た周期である。

三つ目は表示出会い周期である。表示有義波高と同様に波高計の表示に使用されているもので、先の二つのように一定時間の観測した後に統計計算によって得られる出会い周期と異なり、この表示出会い周期は時々刻々と変化するそれまでの出会い周期から現時点での出会い周期が推定計算され、リアルタイムに表示するものである。この表示出会い周期  $T_n$  は、

$$T_n = 0.1T_{now} + 0.9T_{n-1} \quad (4.16)$$

$T_{now}$  : 直前の個別波の周期

で表される。そして、有義波高の場合と同様に、有義波出会い周期やスペクトルピーク出会い周期と異なり一連のシミュレーション波形に対し、一つの出会い周期が算出されるわけでない。よって一連の波形において得られたすべての表示出会い周期の平均をもってその一連の波形を代表する表示出会い周期とし、同時にその標準偏差(以下、表示出会い周期の標準偏差)を求めた。また、この表示出会い周期は、式からもわかるように現時点の波形が平均海面を切った時、つまりその時点での一波の周期が確定した時にのみ、新しい周期を算出、更新表示するようになっている。

有義波高と同様に、この 3 種類四つの出会い周期と標準偏差を計算させる動作を一つの船速に対して、向波、追い波、横波につきそれぞれ波形を変えて 300 回ずつ行った。それらの平均を表 4.2 に示す。

図 4.18 に向波における 3 種類四つの出会い周期のグラフを示す。縦軸は周期(秒)、横軸は船速(k't)である。図によれば、スペクトルピーク出会い周期が最も長く、次ぎに有義波出会い周期、最も短いのは、平均出会い周期と表示出会い周期で、ほぼ同じ程度であった。向波であるから、全体として船速が増すにつれ出会い周期は短くなっている。ここでスベ



クトルピーク出会い周期が他の出会い周期に比べ長くなるのは、スペクトルのピーク周期  $T_p$  と有義波周期  $T_{1/3}$  との関係によるものである。観測データに基づいて導かれた関係式は、

$$T_p \doteq 1.1T_{1/3} \quad (4.17)$$

などがあり、特に風浪とうねりが重なってくると、周期分布の広がりは大きくなり<sup>(9)</sup>、(4.17)式における係数も大きな幅を持つ。今回のシミュレーションの場合を船速の影響がない横波で計算した結果、係数は 1.1755 となった。また、有義波周期と平均周期  $\bar{T}$  の関係も同様に大きな幅を持つが、平均的な関係としては、

$$T_{1/3} \doteq 1.2\bar{T} \quad (4.18)$$

が成立する<sup>(13)</sup>とされている。この係数についても同様に今回のシミュレーション結果から計算したところ係数は 1.2036 となり、ほぼ同じ結果となった。これらを考慮すると図 4.18 においてスペクトルピーク出会い周期が他の周期に比べ長めに示されたのは当然の結果とも言える。

図 4.19 に追い波における 3 種類四つの出会い周期のグラフを示す。同じく縦軸は周期(秒)、横軸は船速(k't)である。図によればいずれの場合も 10k't までは出会い周期は長くなっている。しかし、その後船速が上がるにつれスペクトルピーク出会い周期は長くなるのに対し、有義波出会い周期は 14k't をピークに、残りの 2 つの周期は 10k't をピークに短くなっていく。このことを一例として図 4.12(b)の船速が 24k't 追い波のシミュレーション波形(中段)から考察すると、全体を通して長周期が存在しているが、ゼロアップクロス法では細かな変動しか読みとれていないことがわかる。反対に、スペクトルピーク出会い周期は、フーリエ変換で解析可能な最も低周波にピークがあり(上段)、図 4.19 のグラフでは示していないが、300 回平均でも表 4.2 示すように 1000 秒を越える周期を示し、その後船速の増加と共に短くなる。

図 4.20 に波向き別表示出会い周期の標準偏差の 300 回シミュレーションにおける平均を示す。縦軸は周期の標準偏差、横軸は船速(k't)である。向波では図 4.18 に示したように表示出会い周期が短くなるに伴って、表示出会い周期の標準偏差も小さくなる傾向がある。追い波では図 4.19 に示したように 10k't で周期が最も長くなるが、出会い周期の標準偏差は 12~16k't で最も大きくなる。これらの船速でのシミュレーション波形を見るとわかるように、出会い波形も 8k't までは非常に滑らかな波形であるのに対し、10k't 以降では細かな波形変動が現れてくる。特に 12~16k't では本来の周期であるべき長い周期でゼロアップクロス点を通るものと細かい周期でゼロアップクロス点を通るものの混在が激しい。そ

してスペクトルエネルギーは小さいが、かなりの高周波の成分を持った波が存在していることがわかる。結局、表示出会う周期といえどもゼロアップクロス法を用いているので、様々な周期の影響を受けることになる。このため出会う周期の標準偏差が大きくなったと思われる。また、このことは船舶に追い越される波の成分と船舶を追い越す波の成分が両方とも多く混在していることを表し、実時間での周期表示を難しくさせていると思われる。

さらに、船速を増加させた場合には、シミュレーション波形からもわかるように、細かい周期でゼロアップクロス点を通るものが増えてくるので、その影響により周期も短く表示され、標準偏差も小さくなるのは明らかである。

## 4.2 加速度計について

物理的な要因として、ここでは波高計の船体上下動補正に用いられている加速度計の出力に注目し、特にこの波高計に用いられている加速度計のジンバル機構の効果を検証した。

### 4.2.1 実験概要

波高計に用いられている加速度計の機種等は表 4.3 の実験装置一覧に示してある。この加速度計は、図 4.21 に示すようにダンパーオイルを満たした筐体中に取り付けたジンバル機構を備えており、船体がローリングやピッチング等により傾いても常に船首の鉛直上下加速度のみを計測させようとしている。しかしながら、このジンバル機構の効果については必ずしも検証されていなかった。そこで今回は同じ型式の加速度計を船体に取り付け、ジンバル式と船体固定式では動揺時にどのように加速度の値が変化するか比較実験を行い、ジンバル機構の効果について調査した。なお、同時に船舶建造時から設置されている船首加速度計、船体運動計測装置を用いてローリング、ピッチング等も計測した。

この実験は東京商船大学の練習船汐路丸にて平成 12 年 3 月 7 日から平成 12 年 3 月 9 日に行った。汐路丸の要目は表 4.4 に示すとおりである。そして取得したデータ毎の平均や最大値を表 4.5 に示す。各項目をサンプリングタイム 0.2 秒ごとに 180 秒(3 分)間計測し、一つのデータユニットとした。計測時の天候は風速の項目を見てわかるように全体的に荒天時のものであり、計測船は大きく揺れていた。

### 4.2.2 加速度比較

まず、ジンバル式加速度、後付け固定式加速度、船首備え付け加速度の 3 種類の加速度を時系列化させ、それぞれの比較を行った。図 4.22 はそれぞれの加速度計の船首部内での設置位置を示した写真である。一例として図 4.23 に実験で使用した 3 種類の加速度計で同時に計測した加速度時系列を示す。上段が 3 種類を重ねたもの、中段上がジンバル式加速度計、中段下が後付けの固定式加速度計、下段が船首備え付け加速度の出力時系列である。縦軸は加速度( $g$ )であり、いずれも縮尺は同じである。出力感度、固定や設置方法の

違いによるものと思われるが、船体動揺が激しく加速度が大きい場合、図によれば後付けの固定式加速度計の値にはところどころ髭状の衝撃加速度値が目立つ。ジンバル式の値についても固定式よりは滑らかなものの +側ピーク付近にスパイク状の衝撃加速度が見受けられた。これに対し、船首備え付けは最も滑らかな変化を示した。これらの実験により得られた加速度出力値からジンバル式、固定式、船首備え付けの加速度出力値を比較したが、船体動揺の大小にかかわらず、いずれの計測結果においても出力値の差は  $0.05g$  程度の幅で変動していた。これはジンバル機構の効果によって生じた差ではなく、加速度計の出力感度や回路による差と考えられる。また、船体動揺の大きい小さいに関わらず、3 種類の加速度計とも全体的にはほぼ同じ値の加速度を示しているのは図 4.23 の上段の図に示すとおりである。

#### 4.2.3 重力加速度補正による二回積分値(上下変位量)の変化

先に述べたように、3 種類の加速度計の値はほぼ同じであったが、後付けの固定式加速度計、船体備え付け加速度計には船体の傾きによる地球重力分の加速度も含まれているはずである。そこで、同時に得られたローリング角度とピッチング角度を 2 乗平均平方根した角度  $\theta_A$  を用いて、後付けの固定式加速度計の値に地球重力分の補正を施し、本来ジンバル機構の効果により得られるであろうと予想される加速度を求めた。船体動揺は前後、左右など様々であるが、上下動に比べ微少なものと考え、ここではローリングとピッチングによる傾きにのみを考慮に入れた。補正式は、

$$CorrA = \frac{FixA}{\cos \theta_A} + \left(1 - \frac{1}{\cos \theta_A}\right)g \quad (4.19)$$

$CorrA$  : 補正加速度

$FixA$  : 固定式加速度

$g$  : 地球重力加速度 ( $g = 9.8m/s^2$ )

$$\theta_A = \sqrt{\theta_R^2 + \theta_P^2} \quad (4.20)$$

$\theta_R$  : ローリング角

$\theta_P$  : ピッチング角

と与えられ、 $\theta_A = 0$  の時、つまり船体の傾きが無い場合は固定式の加速度はそのまま船体の上下加速度となる。また、加速度の値は地球重力が含まれているため、通常は常に  $1g$

かかっているのであるが、計測においてはこの場合の値が 0(ゼロ)  $g$  となるよう調整を施している。図 4.24 と図 4.25 は同じ計測データを用いて上記により補正した加速度値とその二回積分値を表した時系列である。上段が後付け固定式加速度計の出力値(桃色)と地球重力補正後の加速度(緑色)の時系列で縦軸は加速度( $g$ )である、中段がそれぞれの加速度値を二回積分して求めた上下変位量の時系列である。下段はローリング角度(黄色)、ピッチング角度(赤色)およびそれらの合成角(青色)の時系列で縦軸は角度(度)である。そして、積分を施す度に長周期ドリフトが発生するので、図 4.24 ではカット周波数 1/15 Hz のハイパスフィルターを図 4.25 ではカット周波数 1/30 Hz のハイパスフィルターをそれぞれ用いている。いずれの図においても、ローリング角やピッチング角による合成角が小さい時は、二回積分値の差はほとんどない。しかし、合成角が大きい時は二回積分値に差が生じてくる。また、使用するハイパスフィルターのカット周波数により二回積分値の差はかなり変わってくる。

#### 4.2.4 髭状の衝撃加速度による二回積分値(上下変位量)の変化

本節第 1 項で加速度の出力値が最も滑らかだったのは、船首備え付けの加速度計であった。一方、髭状の衝撃加速度は後付けの固定式加速度計やジンバル式の加速度計に見られ、これは出力値として適していない。そこで船首備え付けの加速度の値と衝撃加速度が最も多かった固定式加速度を前項と同様に二回積分をすることによって、衝撃加速度が二回積分値(上下変位量)にどのように影響するのか比較した。図 4.26 は船体動揺が少ない場合、図 4.27 は動揺が大きい場合の二回積分値の変化を表したものである。上段は船体備え付け加速度計(水色)と後付け固定式加速度計(桃色)の出力値時系列であり、下段はそれぞれの二回積分値の変化を表している。なお、図 4.26 と図 4.27 の加速度時系列では表示の縮尺の違いに注意されたい。また、いずれの図ともハイパスフィルターのカット周波数は 1/15 Hz である。図 4.26 の船体動揺が少ない場合は、取り付け方法が違っても関わらず、加速度の出力値、二回積分値ともほとんど同じである。しかし、図 4.27 の船体動揺が大きい場合では、ところどころ二回積分値に差がみられる。この部分は上段の後付け固定式加速度計の出力値に衝撃加速度が生じている場所と一致している。そのため二回積分する際の誤差となって現れたと考えられる。この髭状の衝撃加速度が出ることは、船体の上下変位量を補正して波高を表示する際に大きな誤差となるのは明らかである。

## 第5章 考察

本論文では、航行船舶での風と波の計測特性を調べる上で、風については乗組員による観測値と自動計測値を比較し、波については航行船舶が受けるであろう出会波をシミュレーションにより発生させて解析、船首加速度実験では実際の加速度出力を比較した。そしてそれらの精度と特性について考察を行った。

### 5.1 風について

真風速に対する読みとり風向誤差、読みとり風速誤差の割合が大きいほどベクトル計算誤差は大きくなり、さらにその両方の誤差を同時に含んだ場合は、方位によってはさらに大きな計算誤差となって現れる。また、見かけ風向誤差は船体真風向が前方からの場合ベクトル計算誤差を大きくし、見かけ風速誤差は船体真風向が斜め後方からの場合ベクトル計算誤差を大きくする。真風向、真風速の変動は方位によっては見かけ風向、風速に大きな変動を与える。

見かけ風速が小さいと見かけ風向の変動標準偏差は大きくなる。しかし、見かけ風速 **2m/s** 毎の平均風向差と平均風速差のグラフ(図 3.6)によると見かけ風速が小さい時、平均風向差は小さくなっている。これは乗組員の観測が風向の変動に合わせ読みとり時間を変えていると思われる。見かけ風速が **10~18m/s** のとき平均風向差が大きくなっているが、この時の見かけ風速の変動標準偏差は大きいので平均風向差が大きくなっている。これは“短時間の観測”であるため変動が読みとれなかったためと思われる。また、見かけ風速が大きいと見かけ風速の変動標準偏差は大きくなる。これにより読みとり誤差が大きくなり、見かけ風速 **2m/s** 毎の平均風向差・風速差のグラフ(図 3.6)にもあるように見かけ風速が大きくなると平均風速差は大きくなる。これは風向指示計の変動に比べ、風速指示計の変動が小さく感じられるため、変動を見落としがちなのではないかと考えられる。

風向差 **30 度**、風速差 **2m/s** 程度の誤差は、風向、風速の変動が及ぼす読みとり誤差の影響によるところが多く、その誤差を極力減らすためには観測に費やす時間(平均時間)を長くしなければならない。一般的な目安としては、船尾方向からの風で見かけ風速が小さいほど注意深く観測する必要があり、読みとりに費やす平均時間としては少なくとも **30 秒** 以上、できれば **100 秒** 以上の時間が望ましい。

また、風速は高度が高いほど大きくなる。この風観測高さの影響は現代の大型船に対してかなりの差を生じる。そのため概略的な係数であっても「風に対する高さのべき乗法」などに従った更正を早期に導入すべきものと考えられる。

## 5.2 波について

### 5.2.1 有義波高

3種類それぞれの算出方法や波向きの違いにより、有義波高の値はまちまちであったが、スペクトル有義波高が最も針路、速力に影響されない安定的な値を示した。

ゼロアップクロス法による有義波高(1/3 最大波高)については、追い波で船速が 12k't 以上になると有義波高の減少が著しい。追い波中で特に船速が速い場合においては、ゼロアップクロス法は有義波高を算出するのに適していないと言える。このことに関して図 5.1 にゼロアップクロス法による有義波高(1/3 最大波高)の 300 回における標準偏差を示す。図によれば、追い波の場合、船速によってはゼロアップクロス法による有義波高が大きく変動することがわかる。これは、実船計測において追い波では計測波高(有義波高)のばらつきが大きい<sup>(14)</sup>と言う報告と一致している。

また、スペクトル有義波高は波向きに関わらず、全体を通してゼロアップクロス法による有義波高よりも波高値が大きかった。このことを横波つまり船速の影響がない場合で考えると、ゼロアップクロス法による有義波高と比べ約 4.5%ほど大きい。この大きさの関係から(4.11)式の比例係数を計算すると約 3.82 となる。この値については第 4 章、第 1 節、第 3 項(4.1.3)で述べたとおり、(4.11)式の比例係数は実測波形については 4 よりも 3.8 の方が妥当のようである<sup>(9)</sup>と言う報告とほぼ一致している。

表示有義波高は、向波の時はいずれの場合もほとんど変化が無かったが、追い波で船速が増してくると僅かに大きくなる傾向がある。ただし、スペクトル有義波高やゼロアップクロス法による有義波高のいずれと比べても波高値を小さく示している。これに対しても第 4 章、第 1 節、第 3 項(4.1.3)で述べたとおり、ゼロアップクロス法による有義波高に合わせるためには表示有義波高算出の(4.13)式の係数を 10 ではなく、11 程度に度大きくすべきことを示している。

また、追い波の表示有義波高の標準偏差も船速が増すと大きくなる。これは、波高計の表示器を見た時によって、実際の波高とはズレがある場合が考えられる。このズレを減らすためには、表示有義波高の標準偏差の大きさに応じて、(4.14)式の時定数や平均時間を変える等の操作をする必要がある。

### 5.2.2 出会い周期

出会い周期においても 3 種類それぞれの算出方法や波向きの違いにより、その値はまちまちであったが、向波、追い波とも平均出会い周期と表示出会い周期はほぼ同じであった。一方、スペクトルピーク出会い周期において、向波の場合、他の方法による出会い周期と比べてやや周期を長めに示す傾向が見られた。このことは第 4 章、第 1 節、第 4 項(4.1.4)で述べた通り、スペクトルのピーク周期と有義波周期と平均周期の関係で、(4.17)式と(4.18)式によるものと思われる。

図 5.2 に向波における船速毎のゼロアップクロス法での平均周期頻度を示す。これは一連の波形中にゼロアップクロス法により得られた周期の頻度を表したもので、それぞれの

船速につき 300 回行った平均である。つまり、一連のシミュレーション波形において何秒の周期がどのぐらいの頻度で発生するのかを調べたものである。縦軸は平均頻度、横軸は周期(秒)、一番手前が船速 2k't の場合で 2k't ずつ順に一番奥が 24k't の場合である。向波であるから、船速が増すにつれて出会い周期は短くなるのは当然である。しかしここで問題なのは、この図の全平均がゼロアップクロス法による平均出会い周期とすることである。図によれば、船速により頻度は異なるが、頻度のピークが二カ所ある。0 秒に近い周期は細かな雑音成分のような波形が平均水面を切って上下しただけで、本来の周期とは言いがたい。つまり、本来の卓越波の周期は二つ目のピークにあり、ゼロアップクロス法による平均出会い周期ではそれを特定できていない。

さらに、このことは追い波でも同様に言えることで、図 5.3 は追い波における船速毎のゼロアップクロス法での平均周期頻度である。図によれば、特に船速が増し細かな波形が多く存在してくると、頻度のピークは 0 秒付近の一カ所に集まってくる。そのため完全に本来の卓越波の周期を見つけることはできていない。追い波中(特に船速が速い場合)において、ゼロアップクロス法は有義波高(1/3 最大波)と同じく出会い周期を算出するのに適していないと言える。また、このことはゼロアップクロス法を用いている表示出会い周期にも言えることで、ゼロアップクロス法により検出された短い周期成分の影響を多く受けて短くなったと言える。

ゼロアップクロス法により出会い周期を算出する場合、1/3 最大波における出会い周期の平均、つまり有義波出会い周期を採用すると、向波では図 4.18 で示した有義波出会い周期は、図 5.2 に示した二つ目のピークの周期に比較的近い値を示す。追い波でも図 4.19 で示した有義波出会い周期は、図 5.3 に示した二つ目のピーク周期が確認できる 14k't 程度までは比較的近い値を示す。しかし、この方法は平均する周期の数が減ってしまったり、追い波では船速が増してくると意味がなくなると言う欠点も持っている。

### 5.2.3 ジンバル機構搭載加速度計

舶用波高計に用いられている加速度計の実験については、「ジンバル機構搭載の加速度計の出力値」と「後付け固定式加速度計の出力値に地球重力加速度を補正した値」を比較する予定であった。しかし、実験船においてジンバル機構が正常に働かなかったようで、得られると予想していた加速度値が得られなかった。そこで、単にローリング角とピッチング角による傾きの地球重力加速度分を補正しただけであったが、もしジンバル機構によりこの補正したような加速度値が得られるならば、ジンバル機構は有効であると言えよう。しかし、「ジンバル機構搭載加速度計の出力値」と「後付け固定式加速度計の出力値に地球重力加速度を補正した値」が等しいという確証はなく、その検証が出来なかったのは非常に残念であった。ジンバル機構を備えなくても船体動揺により地球重力分を補正できるのであれば、より単純な波高計へと改良することができる。

また今回の実験の際、後付けの固定式加速度計の取り付け方は、図 5.4 に示すように船首の補強材の平らな部分に万力のようなもので一カ所固定しただけだった。その結果、ガタが生じてしまい、これが衝撃加速度発生の原因になったと思われる。加えて、計測装置

の信号入力範囲が $\pm 10\text{v}$ であるのに対し、後付けの固定式加速度計の出力感度が $1\text{g}$ に対して $10\text{v}$ だったため、 $1\text{g}$ 以上の加速度を計測することができなかった。

さらに、ジンバル式の加速度計出力にも僅かに見られた衝撃加速度についても、図 4.21 における加速度を吊り下げる回転軸に僅かでもガタがあったのではないかと推察される。また、出力値が他の加速度計の出力値と同じだったことから、回転軸自体にも問題がある可能性がある。さらに、ローリングやピッチング等の船体運動は船舶の大きさや種類によって大きく異なる。本来であればダンパーオイルの粘度も船舶によって使い分けが必要であるが、今回実験に使用したジンバル機構の加速度計に適切な粘度<sup>(15)</sup>( $5,000\text{cst}$  程度)のダンパーオイルが入っていたかどうかは不明である。このことは早急な確認とメンテナンスが必要である。

結果として、3 種類の加速度計を比べると加速度計出力信号として最も望ましい出力信号を表示したのは、船体備え付け加速度計であった。実験で比較した三つの加速度計の方式、仕様は表 4.3 にも示したとおり、同じ種類の加速度計であることから、出力の違いは固定方法の違いが原因と言える。したがって今後の設置に当たっては、望ましい出力信号を得るために加速度計設置固定を確実にし、定期的な保守をすると共に、場合によってはスパイク状の信号を除去するためのローパスフィルタの組み込みも考慮すべきと思われる。また、第一章でも述べたように、表示波高の違いはこのほかの原因も考えられる。それらについても調査研究し、より精度良く、より簡単な波高計へと改良すべきであろう。



## 第 6 章 結論

### 6.1 風観測に際して

見かけ風向誤差は、船体真風向が前方からの場合に真風向のベクトル計算誤差を大きくする。見かけ風速誤差は、船体真風向が斜め後方からの場合に真風向のベクトル計算誤差を大きくする。

航走する船舶において、できるだけ正しい真風向、真風速を求めるためには、変動する見かけ風の観測に費やす時間(平均時間)をできるだけ長く取るべきであり、一般的な目安として少なくとも 30 秒以上、できれば 100 秒以上の観測が望ましい。

### 6.2 出合い波浪の計測に際して

ゼロアップクロス法による有義波高(1/3 最大波高)は波向きによって異なる性質があるため、波向きの影響を受けない絶対波高の算出という観点から、波高としてはスペクトルからの換算有義波高あるいは表示有義波高の平均を使用すべきである。

また、出合い周期については波向きによって異なることは当然であるが、追い波時における周期については、有義波出合い周期(1/3 最大波周期)あるいは表示出合い周期より、出合いスペクトルピーク周期の方が感覚的に合理的である。

さらに、波高計ユニットに使用されている加速度計支持のためのジンバル機構は有効ではあるが、真の鉛直船首上下加速度を捕らえているかは疑問が持たれるところであり、今後のさらなる比較計測実験と研究が必要である。

## 謝辞

最後に、この論文を作成するにあたり数多くの御指導、御協力を頂きました桑島先生ならびに岩坂先生、および環境科学実験室の皆様に変にお世話になりました。また、長年に亘りデータ取得に協力を頂いたコンテナ船「かりふおるにあ・まーきゅりー」、「ALTAIR」の乗組員の方々、実験では汐路丸船長をはじめとする乗組員の方々にもお世話になりました。この場をお借りして感謝の意を表します。

## 参考文献

- (1) 桑島進：特集波浪データ「目視による波浪の観測」，TECHNOMARINE，日本造船学会誌，第 831 号，pp.11-9，平成 10 年 9 月
- (2) 松本次男：「海洋波浪の調査研究に関する現況報告書」，ECOR 日本委員会波浪委員会編，ECOR 日本委員会，pp.9，昭和 50 年 12 月
- (3) 桑島進：「船用超音波式波高計による航走出会い波浪の観測」，日本航海学会論文集，第 64 号，pp.87～95，昭和 56 年 9 月
- (4) 坂元賢治・小幡紀一：「マイクロ波式波高計の改良について」，神戸海洋気象台部内研究発表会概要，平成 11 年 11 月
- (5) 光易恒：「海洋波の物理」，岩波書店，210P，平成 7 年 2 月
- (6) 気象学ハンドブック編集委員会：「気象学ハンドブック」，技報堂，pp.347，昭和 34 年 1 月
- (7) 中央気象台編：「船舶気象観測指針」，船舶気象連絡会刊，改訂版（第 1 回），1956 年
- (8) 気象庁：「船舶気象観測指針」，気象庁，改訂第 5 版，pp.31，平成 6 年 3 月
- (9) 合田良實：「港湾構造物の耐波設計」，鹿島出版会，237P，昭和 52 年 10 月
- (10) YASUDA, Y., S.KUWASHIMA and Y.KANAI : A SHIP BORNE-TYPE WAVE HEIGHT METER FOR OCEAN GOING VESSELS, USING MICROWAVE DOPPLER RADAR, IEEE. J. of Ocean Engineering Vol. OE-10. No2, pp.138～143, April 1985.
- (11) 安田明生・金居康文・桑島進：「マイクロ波を用いた船用簡易波高計の開発」，日本航海学会論文集，第 66 号，pp.31～38，昭和 57 年 2 月
- (12) 桑島進：航海「波浪の確率密度分布について」，日本航海学会誌，第 49 号，pp.40～46，昭和 51 年 6 月
- (13) 山口正隆：「重回帰分析に基づく波浪の統計的特性の検討」，第 33 回海岸工学講演会論文集，pp.139～143，昭和 61 年
- (14) 矢吹英雄：「マイクロ波式波高計の使用結果について」，日本航海学会航法研究部会 AUNAR，平成 10 年 12 月
- (15) 桑島進：「船用ジンバル装置の特性について」，日本航海学会論文集，第 69 号，pp.159～170，昭和 57 年 9 月

表 2.1 気象観測表作成項目

観測年月日時

船舶位置 緯度  
経度

雲	雲底の高さ 水平視程 全雲量 低層雲の量 雲の種類	低層雲 中層雲 高層雲
---	---------------------------------------	-------------------

風	風向 風速
---	----------

温度	乾球 湿球 露点 海水
----	----------------------

気圧	気圧 気圧傾向 変化量
----	-------------------

天気	現在天気 過去天気
----	--------------

進路  
平均速度

波浪	周期 高さ
----	----------

風浪	周期 高さ
----	----------

うねり	方向 周期 高さ
-----	----------------

表 3.1 風観測データ取得船舶要目

船舶要目

船名	かりふおるにあまーきゅりー	NYK ALTAIR
運航期間	1992年8月～1996年5月	1996年6月～現在
データ数	1598	39
船籍	日本	パナマ
総トン数(トン)	41442	63163
純トン数(トン)	15149	60117
全長(m)	247.85	299.95
垂線間長(m)	230	283
幅(m)	32.22	37.1
深さ(m)	21	21.8
喫水(m)	11	13
主機	ディーゼル 1機 32700ps (24050kw)	ディーゼル 1機 59300ps (43620kw)

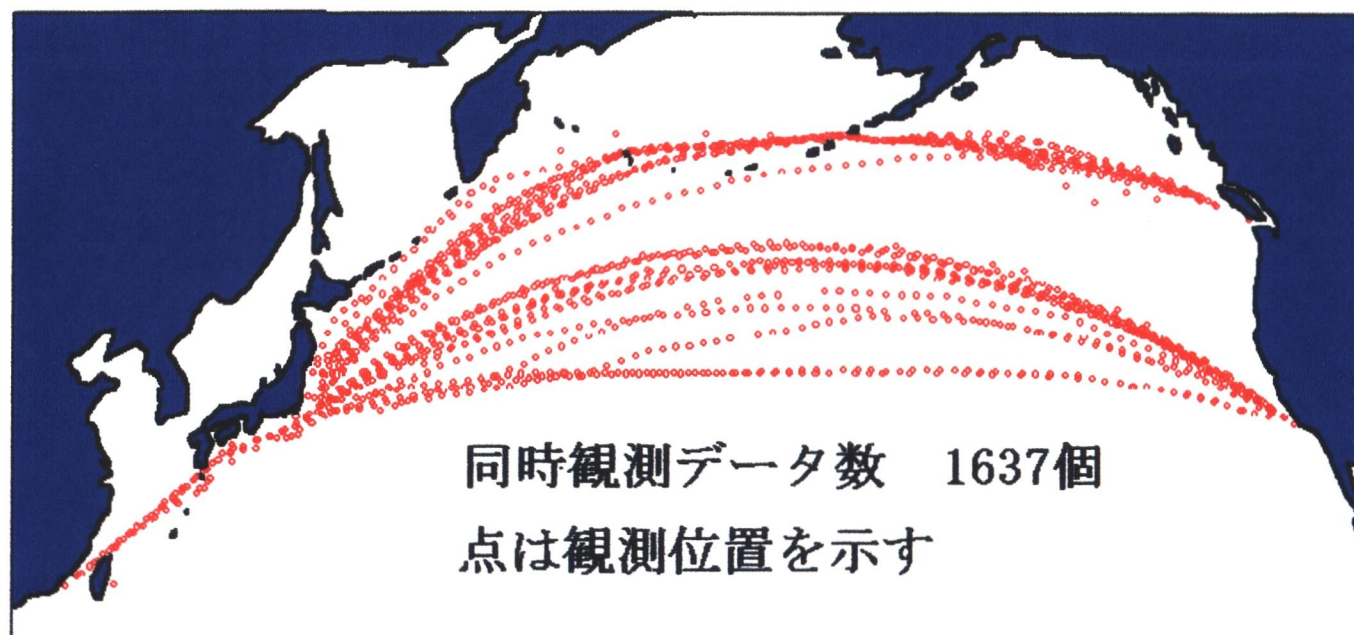
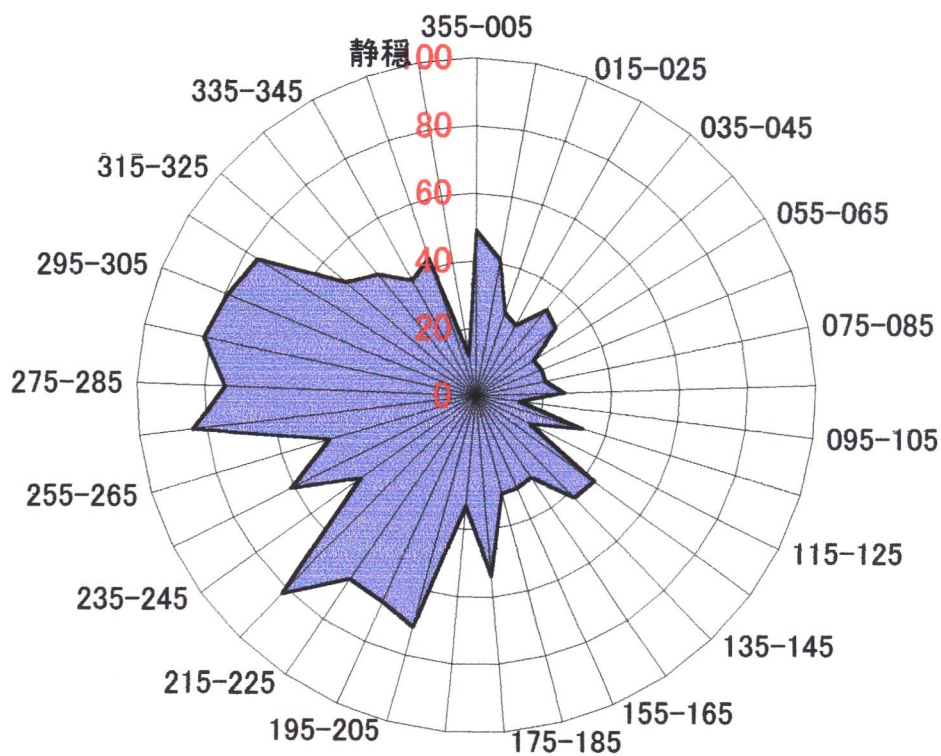
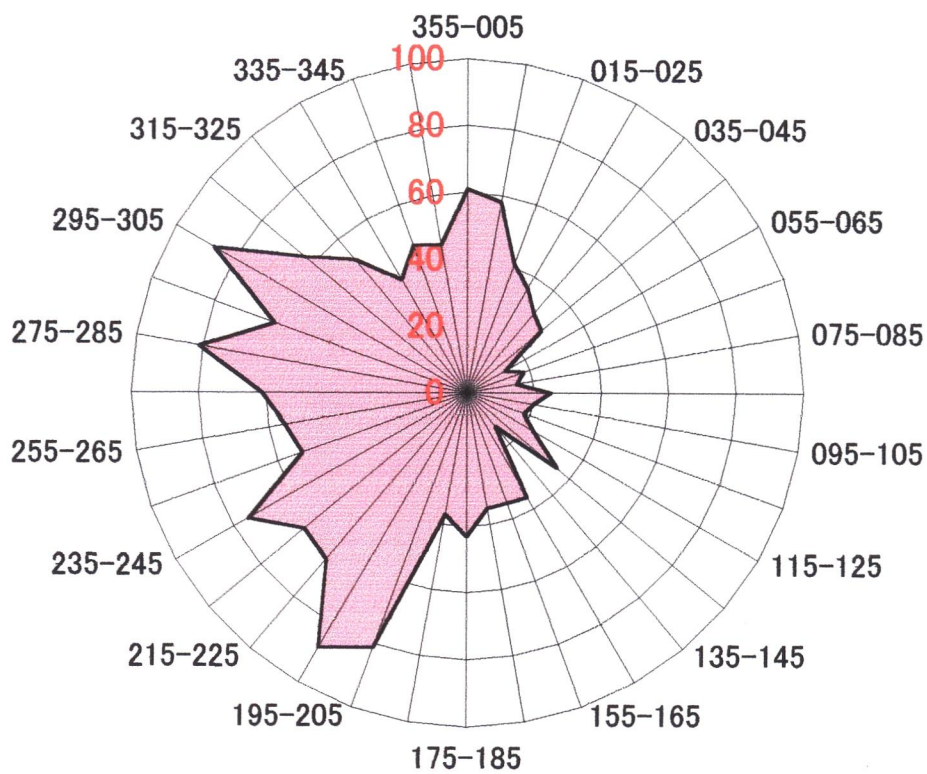


図 3.1 データ取得海域



乗組員による観測値 真風向別頻度



自動計測値 真風向別頻度

図 3.2 真風向別取得データ頻度

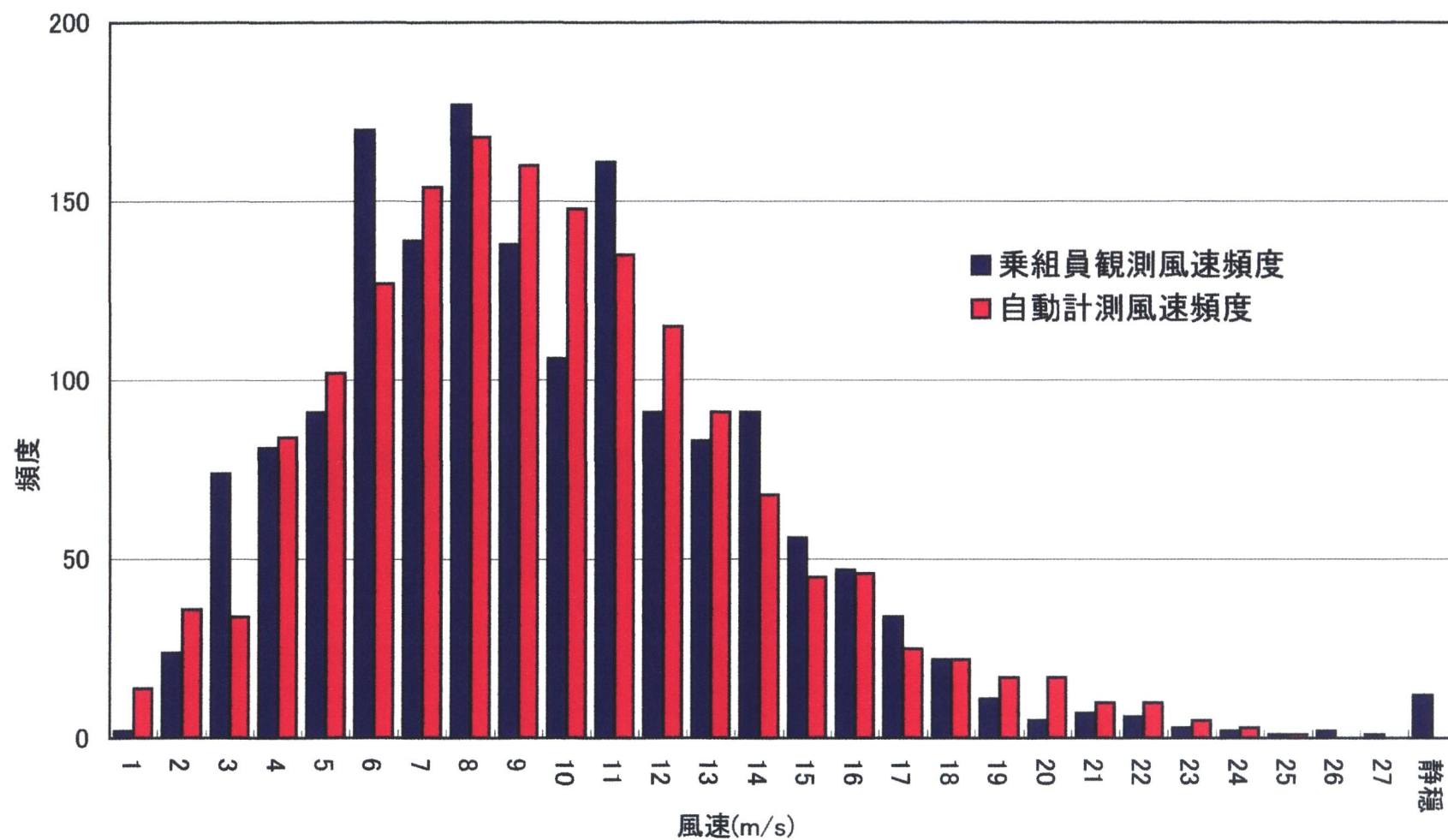


図 3.3 真風速別取得データ頻度



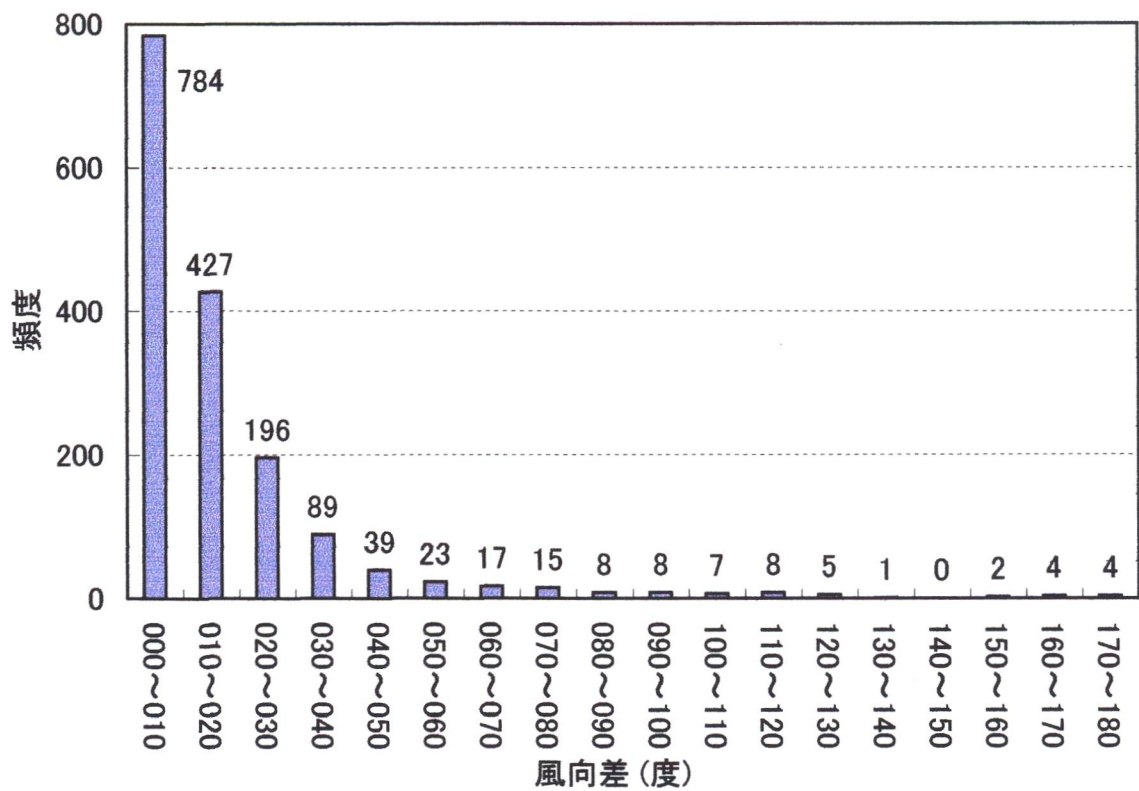


図 3.4 風向差頻度グラフ

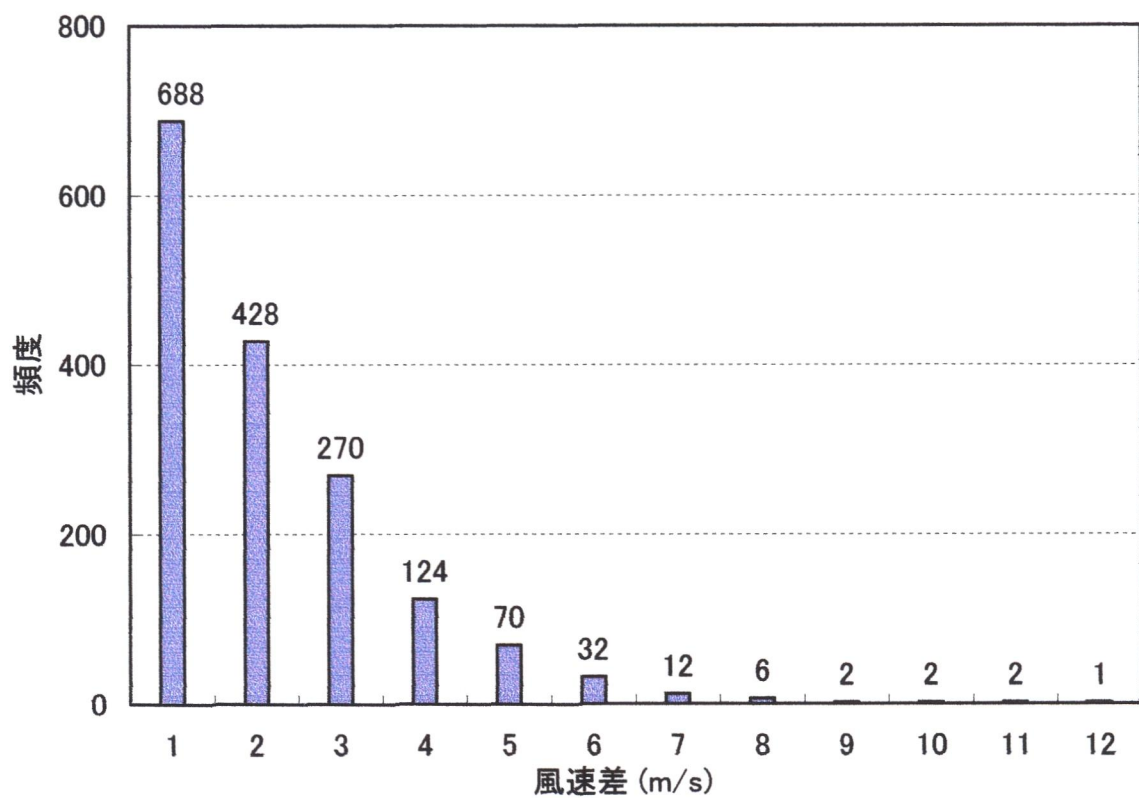


図 3.5 風速差別頻度グラフ

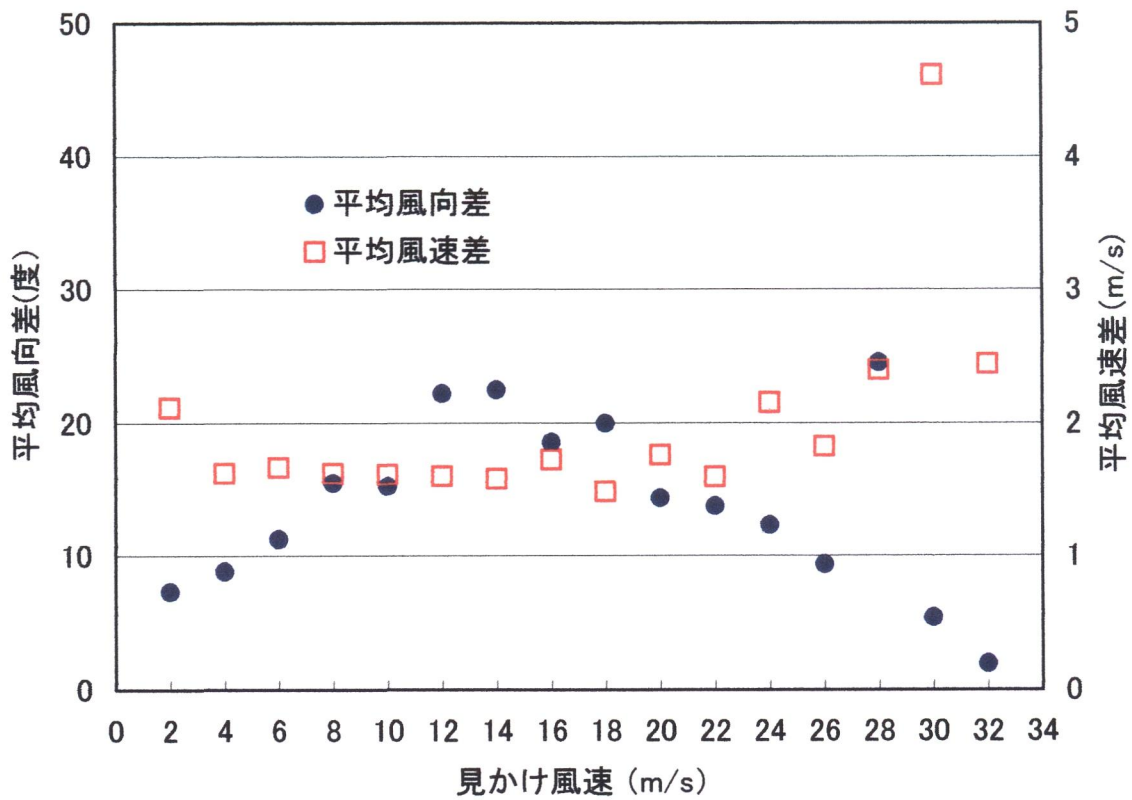


図 3.6 見かけ風速2m/s毎の平均風向差と平均風速差

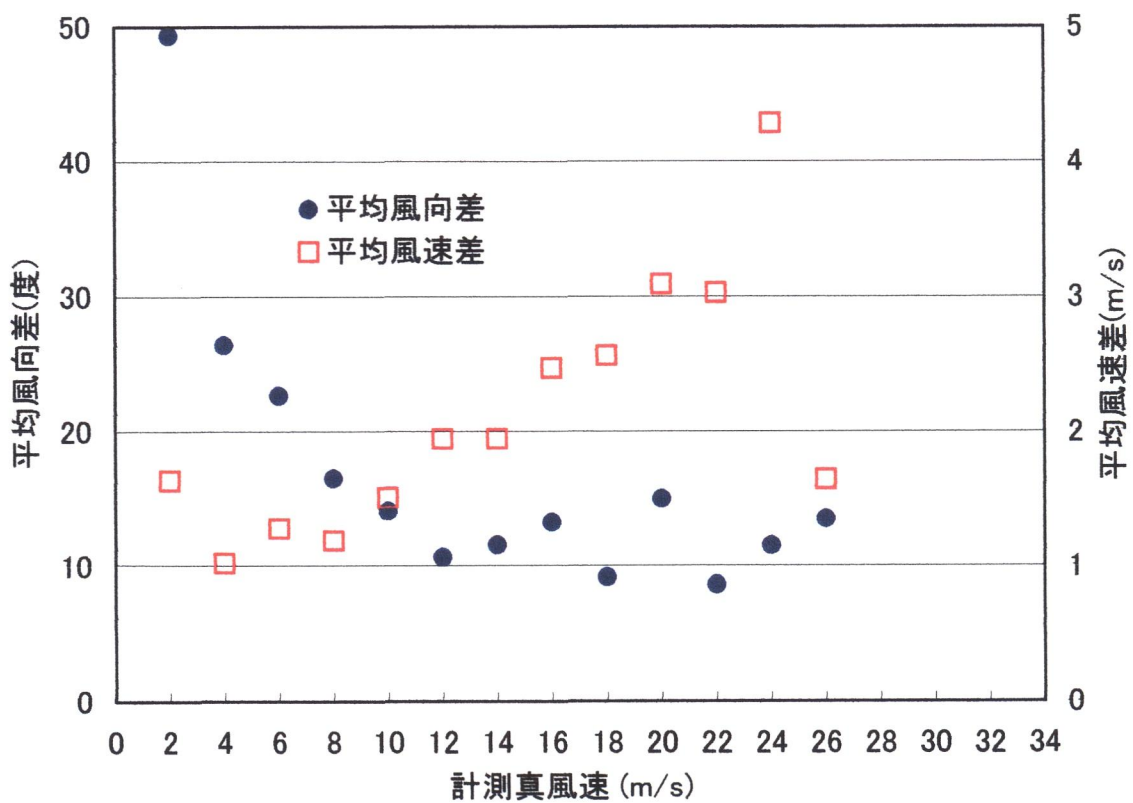


図 3.7 計測真風速2m/s毎の平均風向差と平均風速差

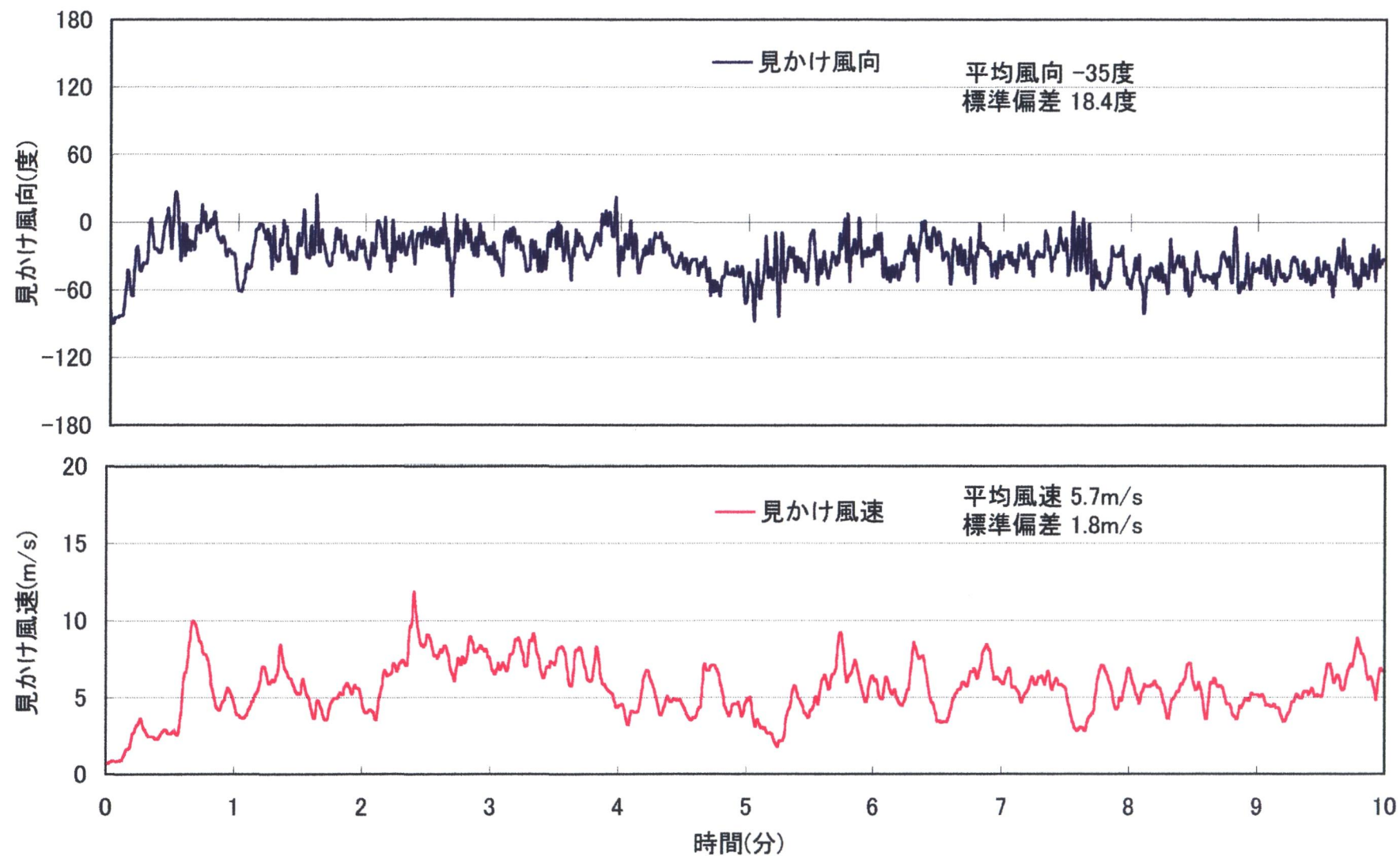


図 3.8 10分間の見かけ風の時系列 (上段: 見かけ風向、下段: 見かけ風速)

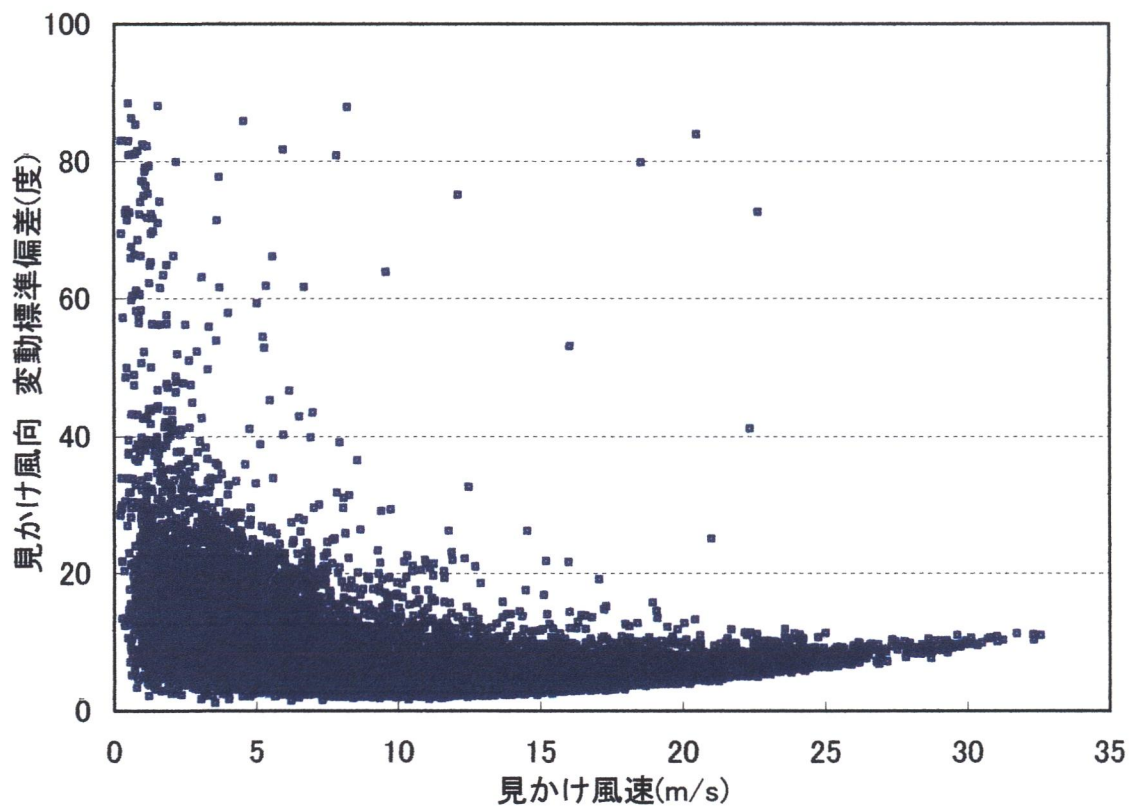


図 3.9 見かけ風速と見かけ風向標準偏差の関係

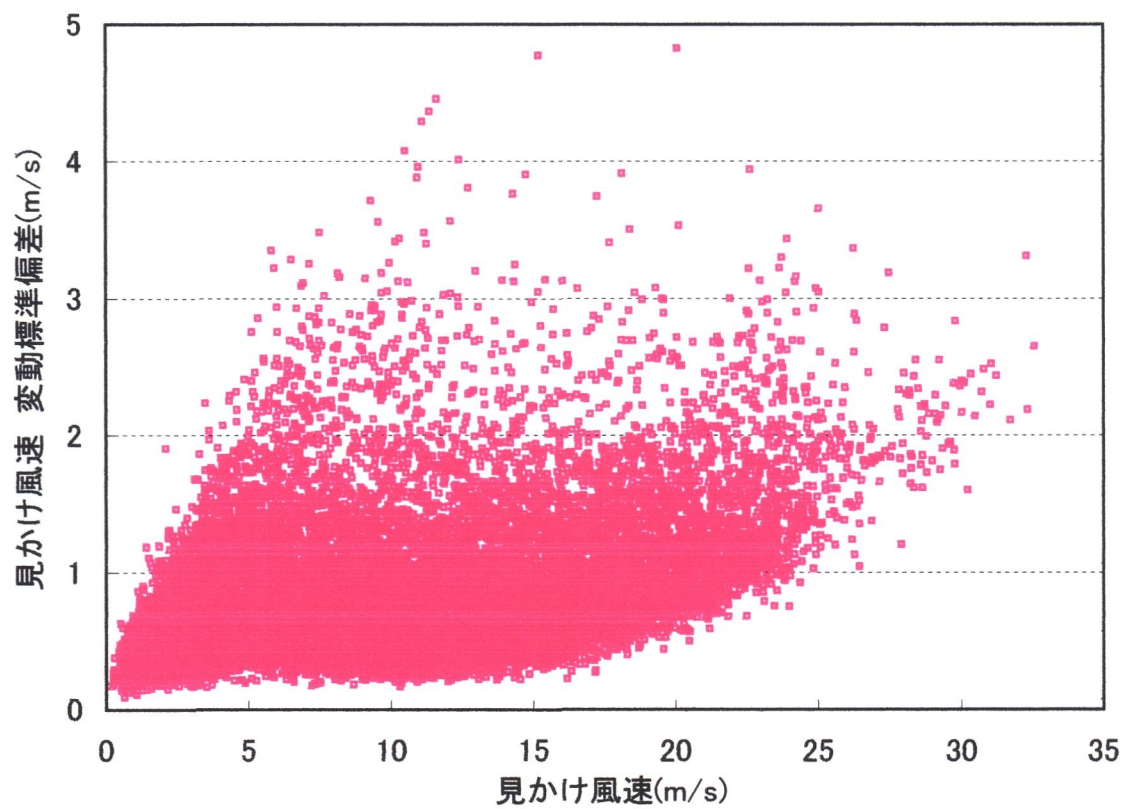


図 3.10 見かけ風速と見かけ風速標準偏差の関係



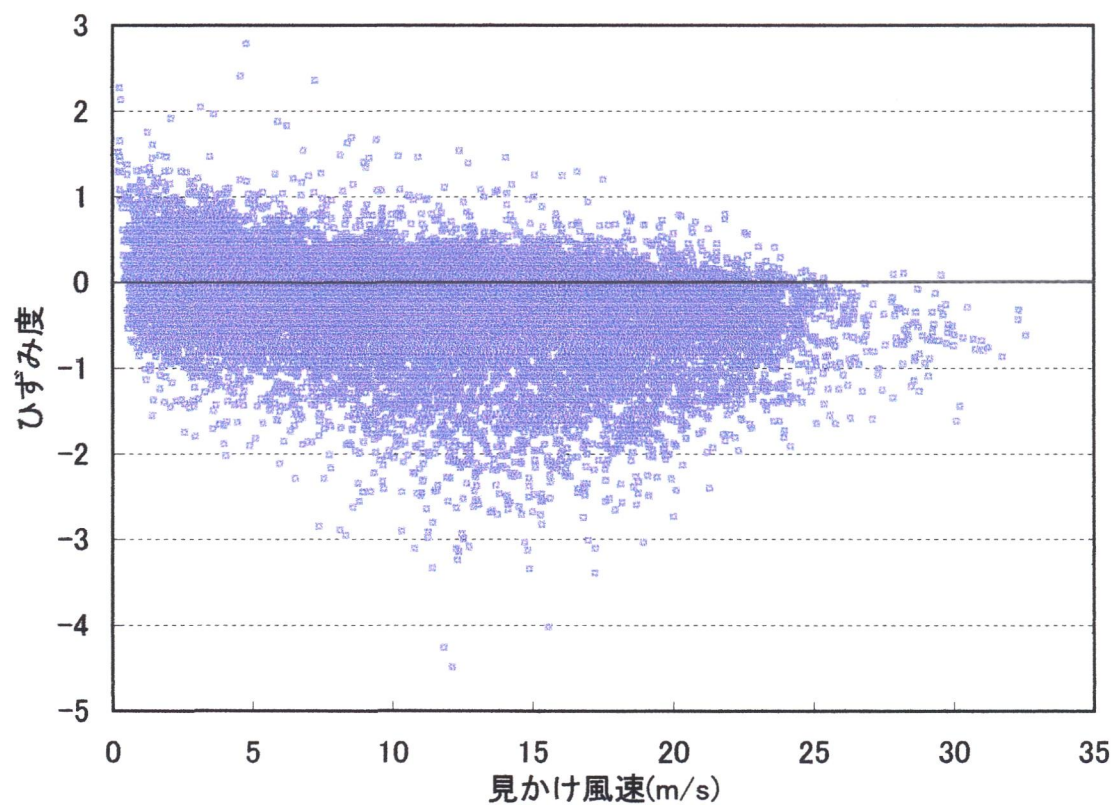


図 3.11 見かけ風速とひずみ度の関係

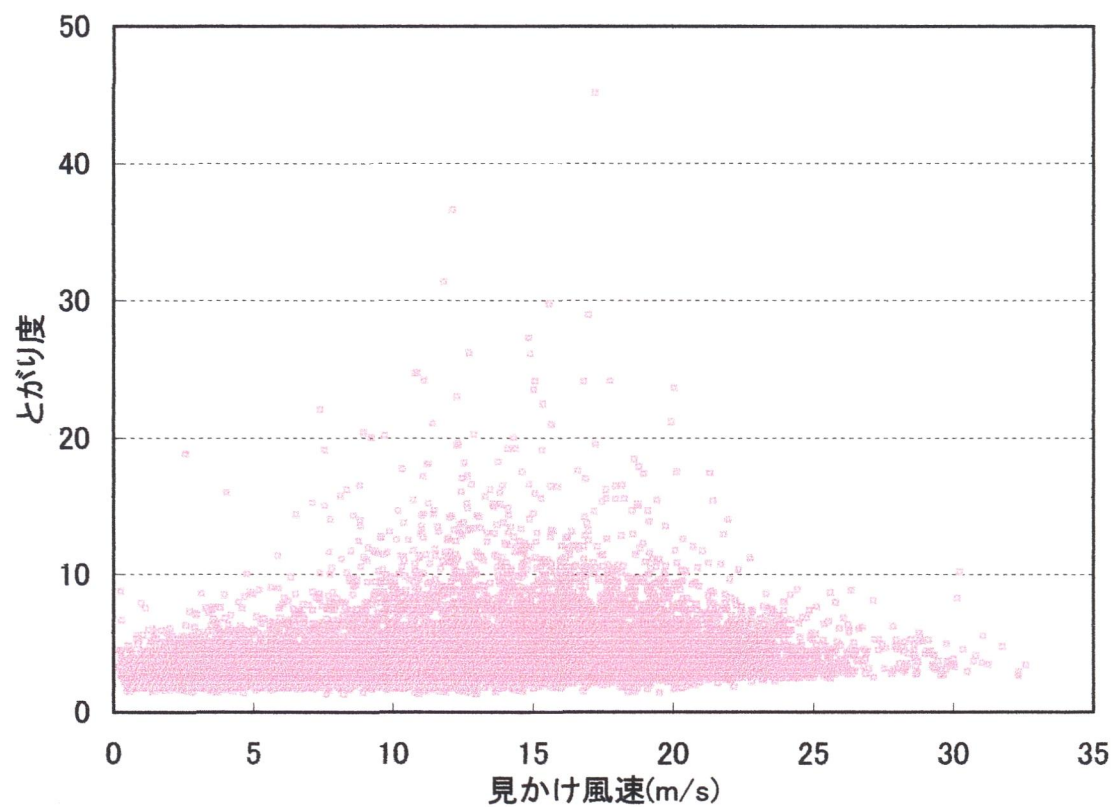


図 3.12 見かけ風速ととがり度の関係

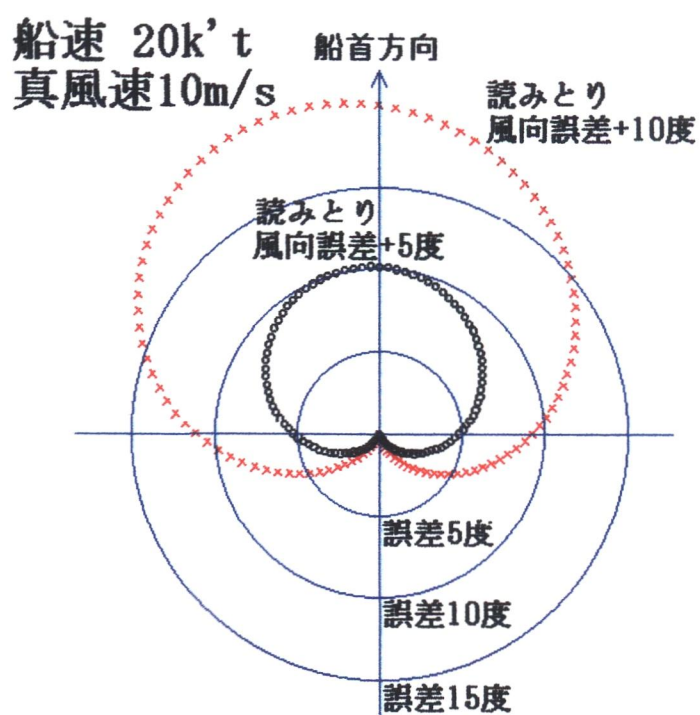


図 3.13(a) 見かけ風向の読みとり誤差が  
風向に及ぼす誤差 (真風速10m/s)

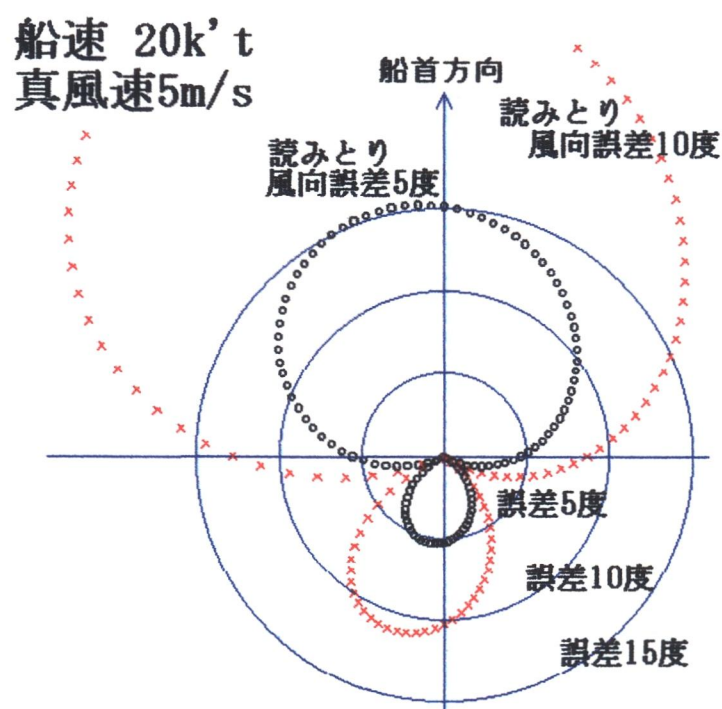


図 3.13(b) 見かけ風向の読みとり誤差が  
風向に及ぼす誤差 (真風速5m/s)

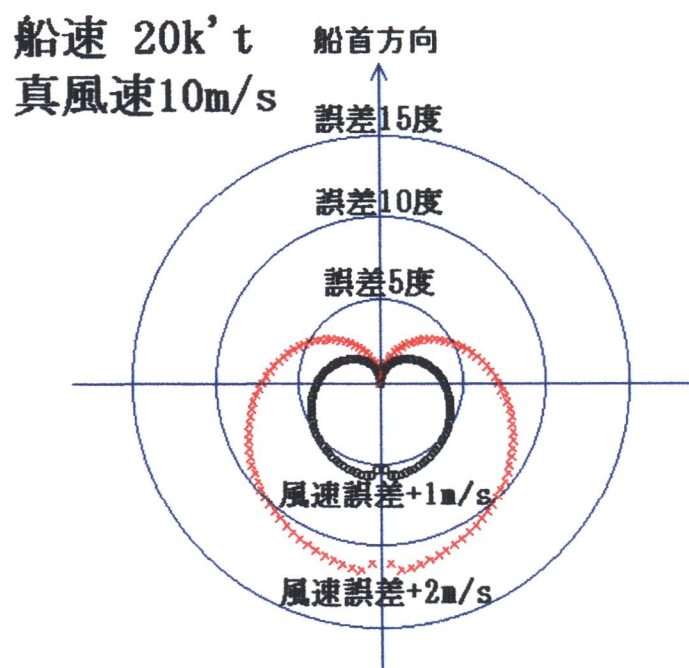


図 3.14(a) 見かけ風向の読みとり誤差が風向に及ぼす誤差 (真風速10m/s)

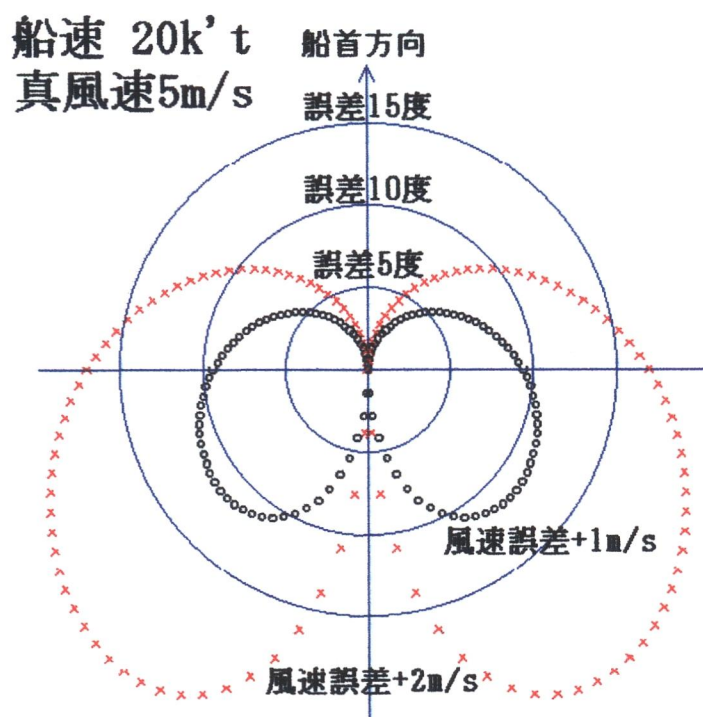


図 3.14(b) 見かけ風速の読みとり誤差が風向に及ぼす誤差 (真風速5m/s)

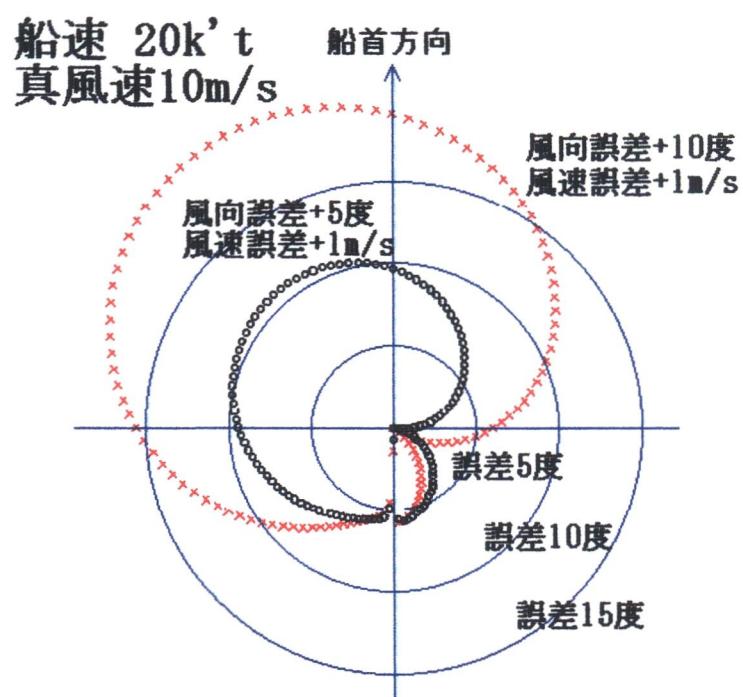


図 3.15(a) 見かけ風向、風速の読みとり誤差が風向に及ぼす誤差 (真風速10m/s)

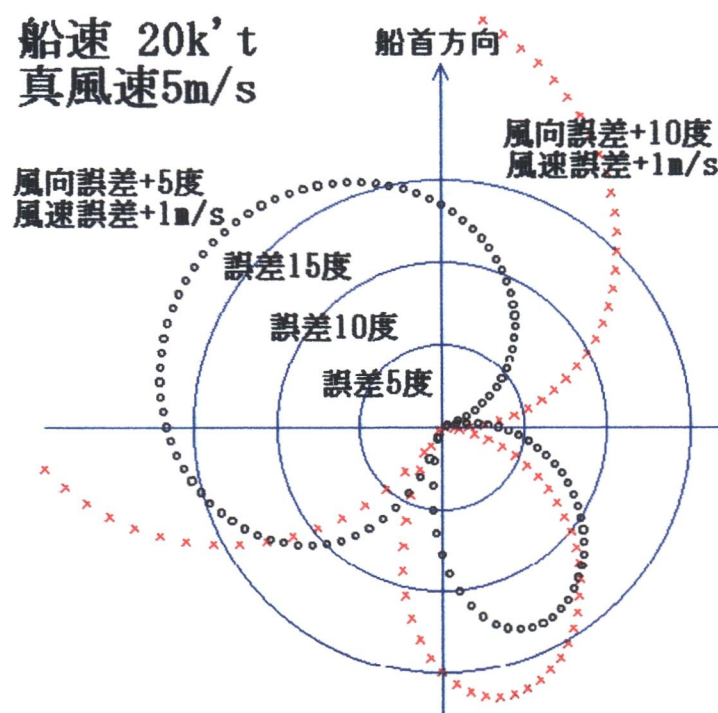


図 3.15(b) 見かけ風向、風速の読みとり誤差が風向に及ぼす誤差 (真風速5m/s)



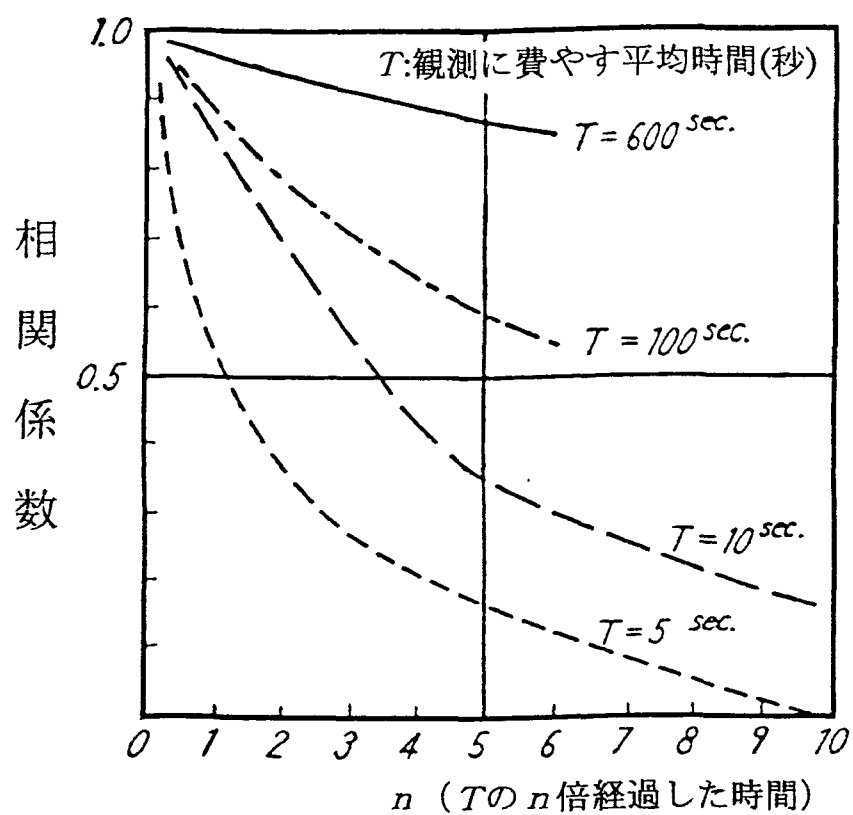


図 3.16 平均時間と風速持続性の相関関係

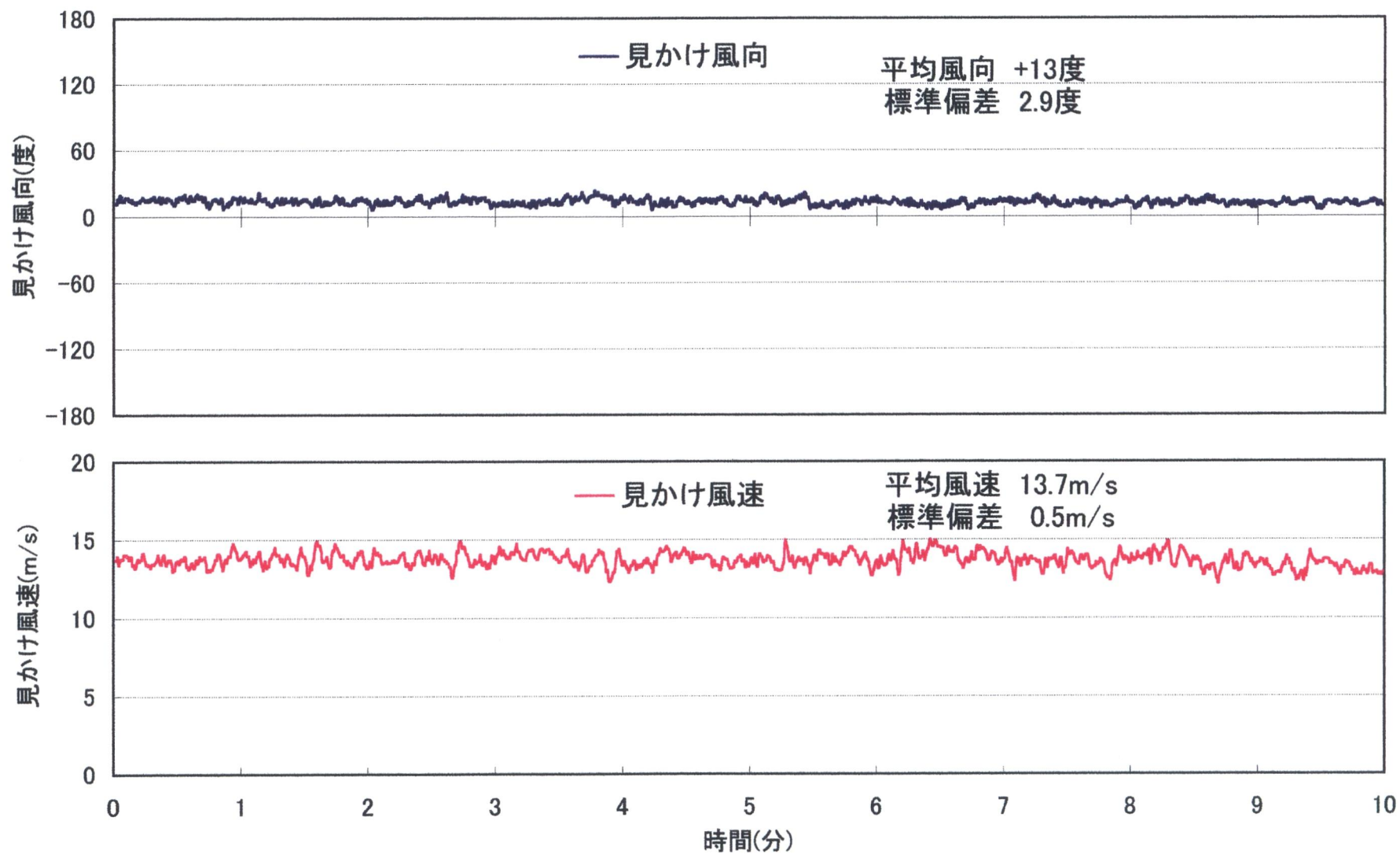


図 3.17 風変動の標準偏差が小さい時の10分間の時系列（上段：見かけ風向、下段：見かけ風速）

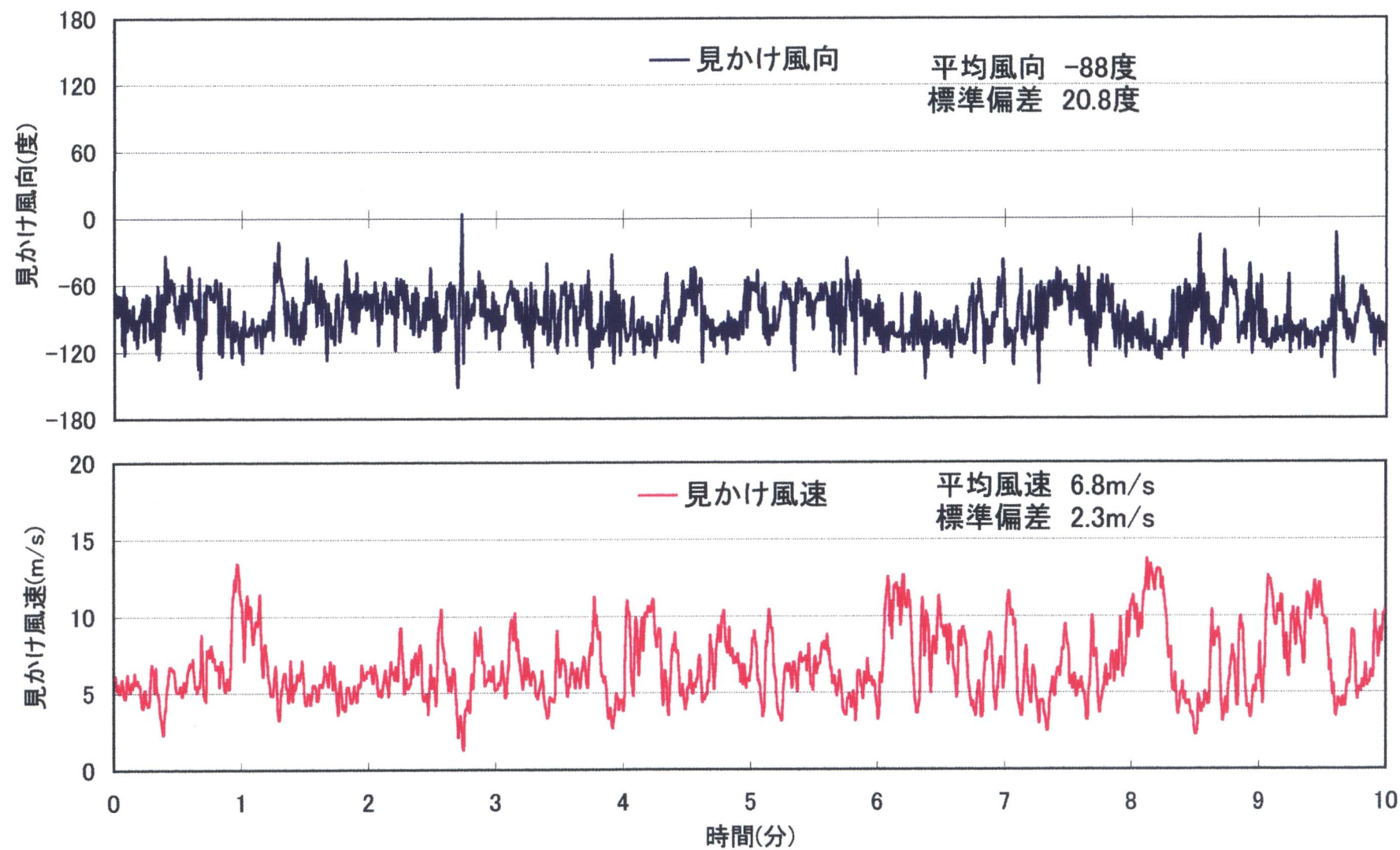


図 3.18 風変動の標準偏差が大きい時の10分間の時系列(上段:見かけ風向、下段:見かけ風速)

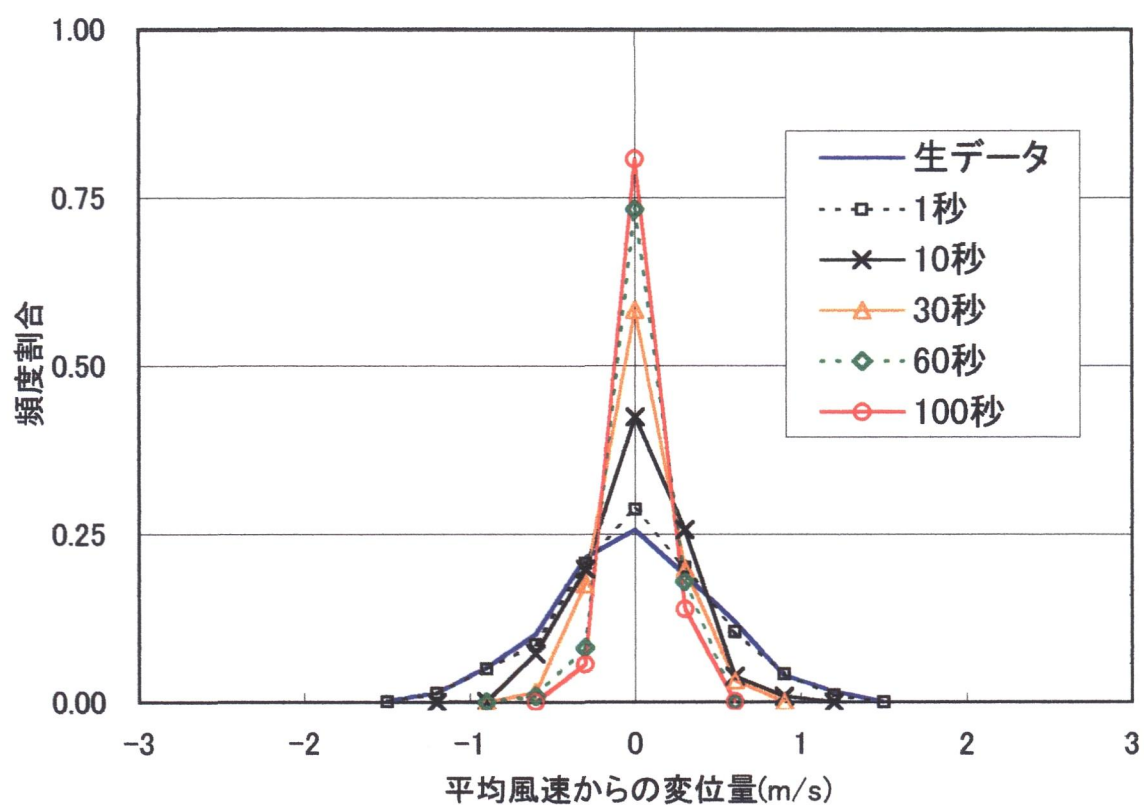
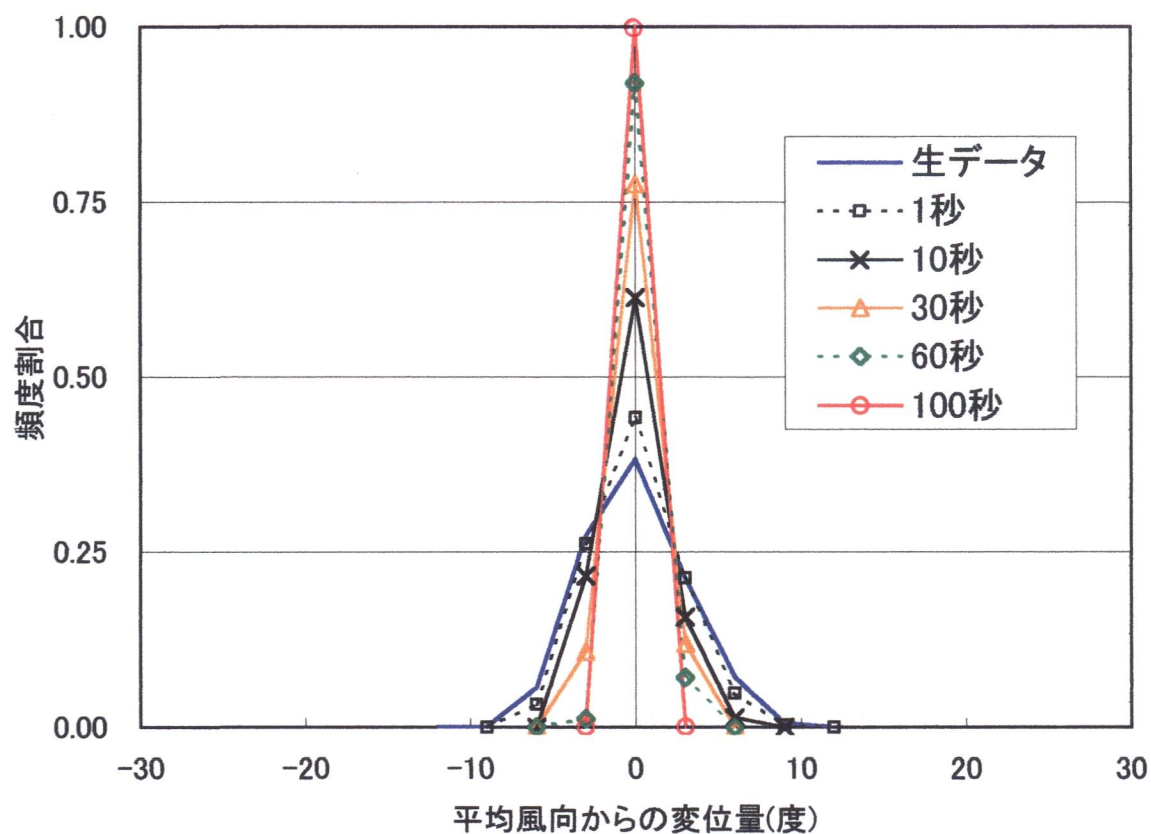


図 3.19 風変動の標準偏差が小さい時の観測平均時間による平均値分布  
(上段:見かけ風向、下段:見かけ風速)

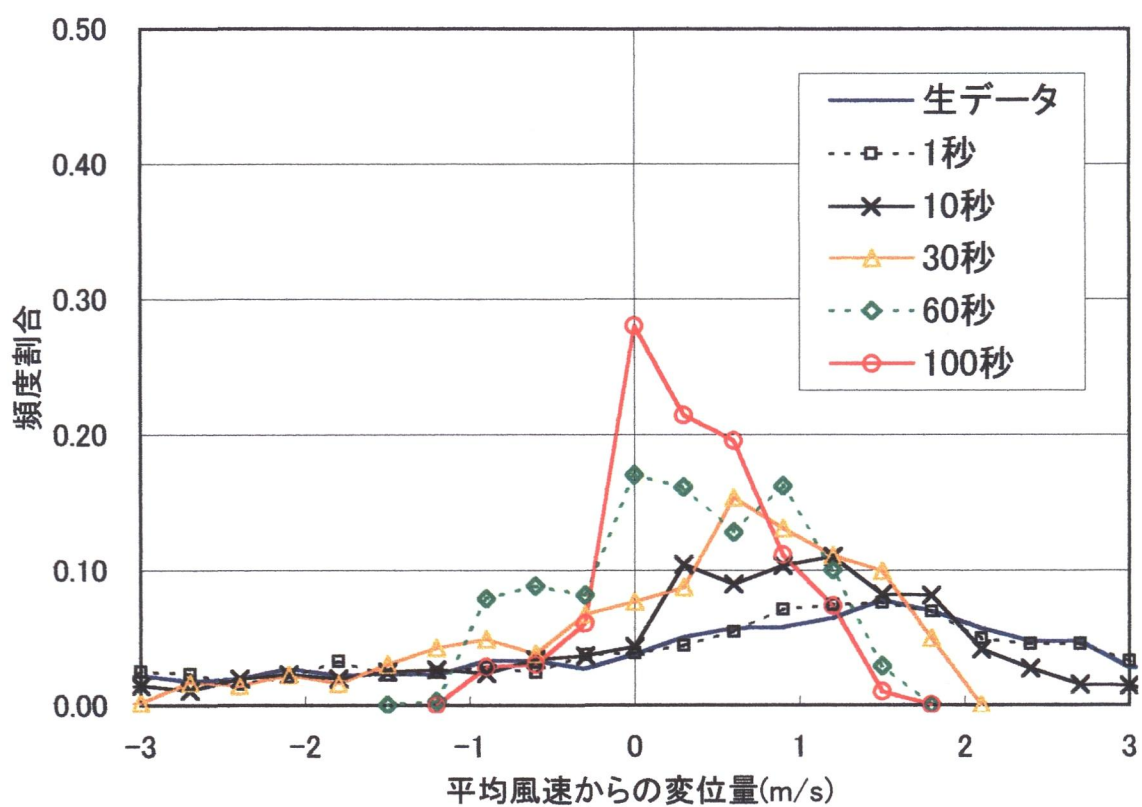
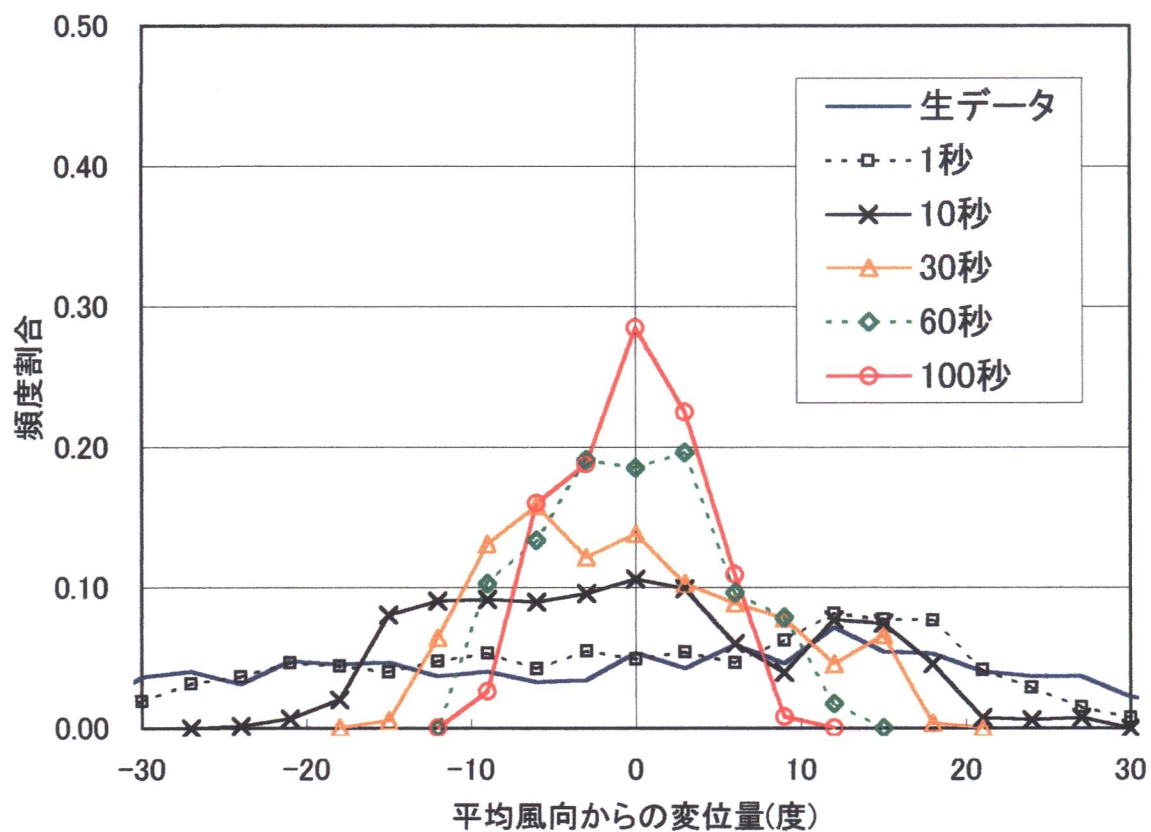


図 3.20 風変動の標準偏差が大きい時の観測平均時間による平均値分布  
(上段: 見かけ風向、下段: 見かけ風速)

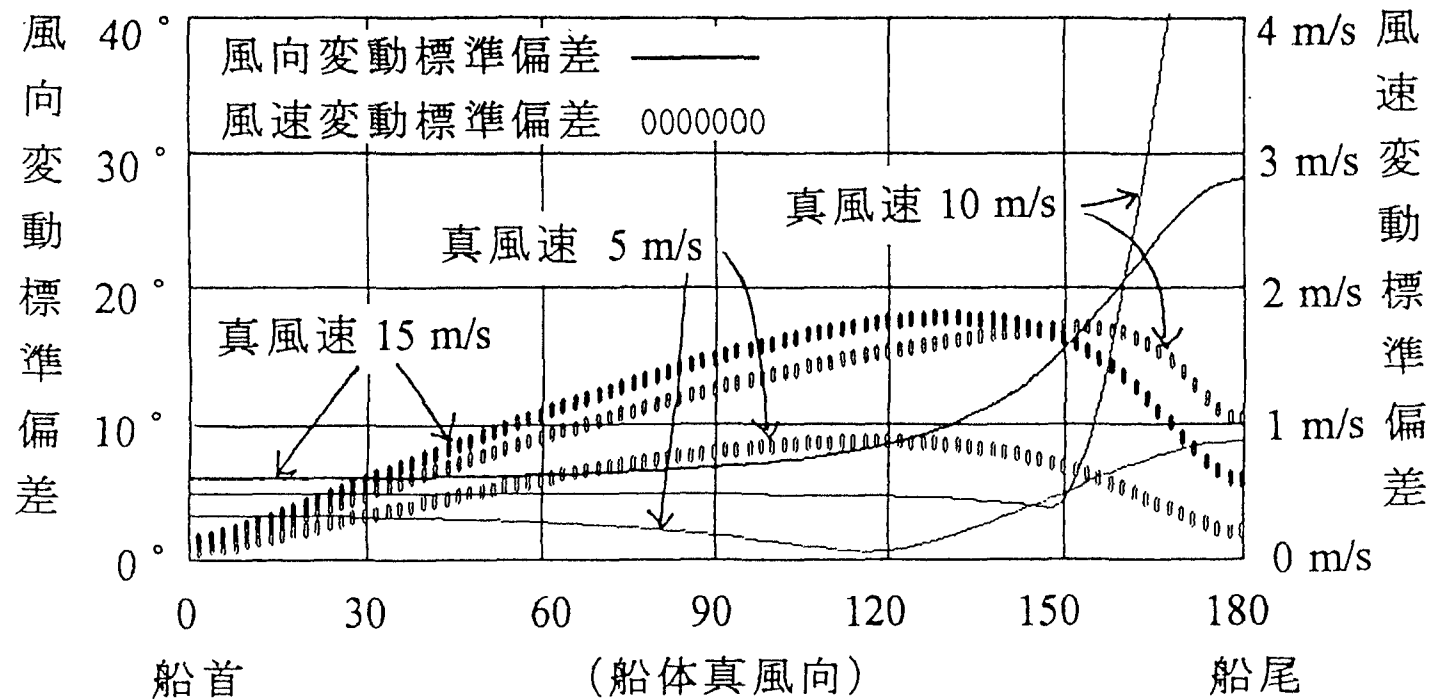


図 3.21 真風向の変動が生じさせる見かけ風向、風速の変動

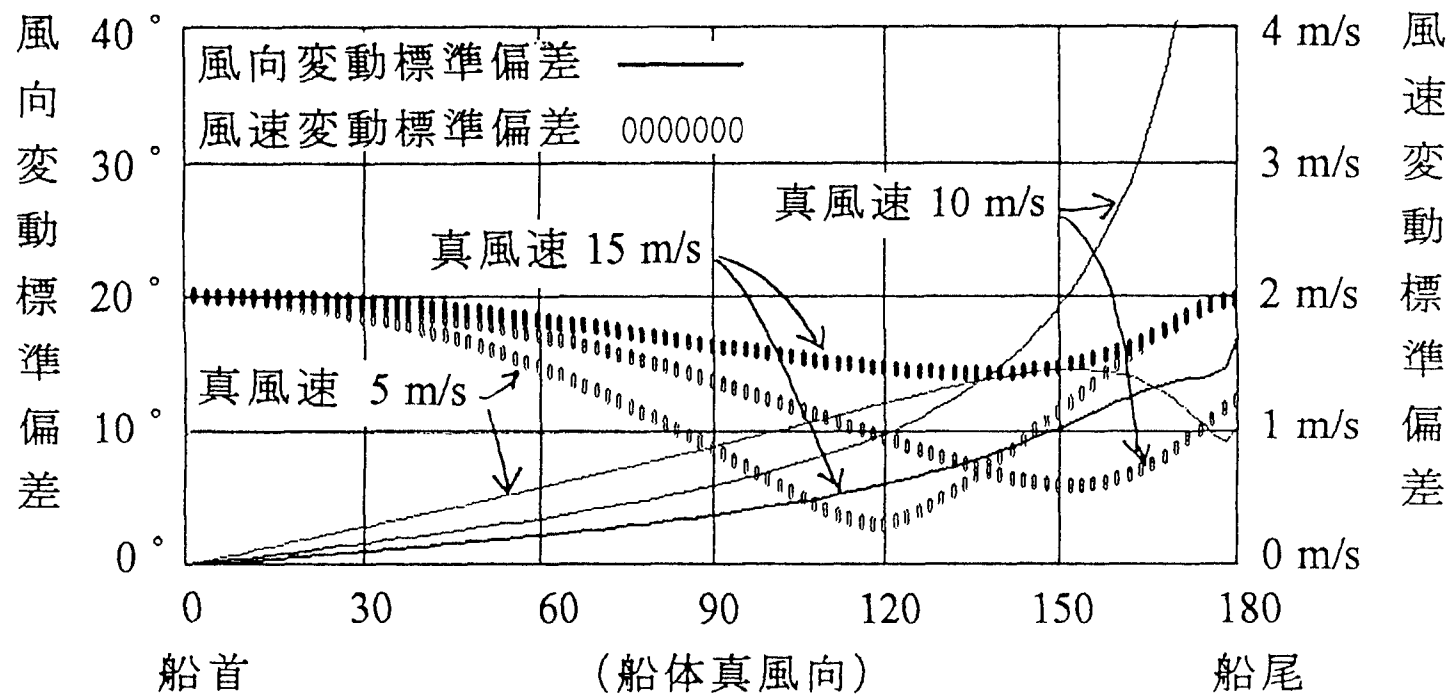


図 3.22 真風速の変動が生じさせる見かけ風向、風速の変動

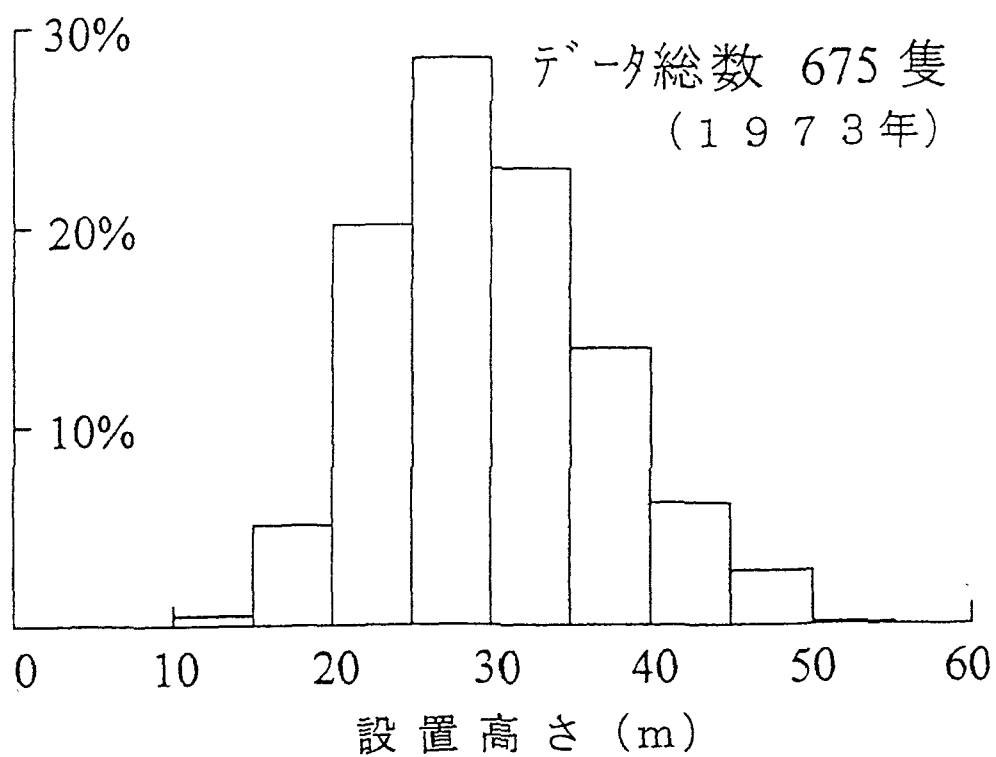


図 3.23 風向風速計の設置高さ別の隻数割合



表 4.1 有義波高等の300回平均

向波 船速	有義波高	ゼロアップクロス法		表示有義波高		波の数
	(スペクトル)	1/3最大波	平均波	平均	標準偏差	
2	2.13205504	2.02897843	1.27408896	1.838878	0.104653	356.8467
4	2.13336739	2.02242164	1.25621092	1.84299	0.095152	406.9733
6	2.13210294	2.01593796	1.23918966	1.842276	0.083032	457.1167
8	2.13243152	2.00435626	1.22526046	1.841008	0.077943	507.3767
10	2.13328531	1.99603584	1.21056919	1.84152	0.069055	559.4
12	2.13114205	1.98884959	1.20155023	1.841161	0.064095	608.03
14	2.13276612	1.98045972	1.19191963	1.841405	0.056584	659.1167
16	2.1324071	1.97367077	1.18311655	1.841705	0.05234	708.98
18	2.13264117	1.96981106	1.17925916	1.842282	0.047188	756.6467
20	2.13348953	1.96439374	1.17307875	1.842087	0.046716	805.6967
22	2.13254854	1.95644286	1.16707928	1.841626	0.043981	853.87
24	2.13274037	1.95697728	1.1673684	1.842	0.041968	897.6

横波 船速	有義波高	ゼロアップクロス法		表示有義波高		波の数
	(スペクトル)	1/3最大波	平均波	平均	標準偏差	
2	2.13234657	2.03830955	1.29284906	1.8395	0.119729	308.3667
4	2.1331183	2.0376841	1.29349259	1.840948	0.121065	308.1833
6	2.13129325	2.03629369	1.29333869	1.841634	0.118219	308.18
8	2.13398826	2.03929218	1.29607668	1.842299	0.119306	307.72
10	2.13498403	2.03979747	1.29609835	1.843183	0.120518	307.9367
12	2.1295785	2.03309483	1.29480779	1.842315	0.12169	307.4367
14	2.1307971	2.03419713	1.29690901	1.843195	0.117941	307.5467
16	2.13165395	2.03538171	1.29570883	1.842909	0.117308	307.96
18	2.13348937	2.03986705	1.29766351	1.843174	0.119657	307.2333
20	2.13441277	2.03948945	1.29864185	1.842486	0.117088	307.07
22	2.13285511	2.03763273	1.29465888	1.840108	0.121446	307.9367
24	2.13349175	2.03918318	1.29631274	1.841457	0.11976	307.8

追い波 船速	有義波高 (スペクトル)		ゼロアップクロス法 1/3最大波 平均波		表示有義波高 平均 標準偏差		波の数
2	2.13379939	2.0465142	1.31406081	1.841497	0.139103	260.5467	
4	2.13289069	2.06863344	1.32733169	1.840685	0.169888	216.11	
6	2.12590514	2.08825892	1.33046455	1.844248	0.226569	176.3833	
8	2.13599854	2.09199461	1.33275708	1.859581	0.327966	146.8067	
10	2.11016361	2.01472521	1.23049542	1.846503	0.377059	133.86	
12	2.12835993	1.90593853	1.03480736	1.853146	0.34904	141.1967	
14	2.13172682	1.65448206	0.82351842	1.867295	0.326154	166.4067	
16	2.1281832	1.39103572	0.69619295	1.871786	0.367344	203.2567	
18	2.12327613	1.26720867	0.65942964	1.871106	0.389247	245.0367	
20	2.12201976	1.2519756	0.6694136	1.876926	0.422063	288.9667	
22	2.12124095	1.29271613	0.70105914	1.874649	0.416259	337.4967	
24	2.12445945	1.36108998	0.74398556	1.889357	0.40477	381.0867	

表 4.2 出会い周期の300回平均

向波 船速	ピークスペクトル	ゼロアップクロス法		表示出会い周期	
	出会い周期	有義波出会い周期	平均出会い周期	平均	標準偏差
2	6.913773513	5.802989759	4.59161028	4.59202	0.66229
4	6.368573269	5.284813562	4.025515595	4.02729	0.62548
6	5.943238127	4.847419117	3.584078924	3.58064	0.59081
8	5.687547432	4.475740627	3.229153686	3.22534	0.55133
10	5.190972221	4.140970342	2.928499965	2.93204	0.51646
12	5.038553648	3.85257402	2.694665913	2.69662	0.48694
14	4.709970709	3.603503619	2.485886923	2.48558	0.45806
16	4.464692872	3.382094287	2.310731999	2.31408	0.43528
18	4.419871324	3.190414348	2.165298184	2.1684	0.40882
20	4.033390247	3.021178026	2.033386933	2.03356	0.38857
22	3.873906424	2.860165371	1.918650846	1.92467	0.36901
24	3.647585577	2.732561218	1.825327556	1.8243	0.35193

横波 船速	ピークスペクトル	ゼロアップクロス法		表示出会い周期	
	出会い周期	有義波出会い周期	平均出会い周期	平均	標準偏差
2	7.566279819	6.394284406	5.315311385	5.326	0.67836
4	7.568232907	6.418963262	5.316499654	5.33526	0.68403
6	7.593820141	6.423943844	5.317750298	5.3313	0.68101
8	7.571855057	6.399048608	5.325808206	5.33674	0.67624
10	7.572285754	6.423329587	5.322590128	5.34076	0.68922
12	7.596383947	6.413245333	5.331071987	5.33074	0.67888
14	7.61305524	6.409906747	5.329251816	5.32525	0.68531
16	7.579460891	6.40112188	5.32234288	5.329	0.68358
18	7.553021245	6.401957354	5.33412536	5.30882	0.68323
20	7.57203095	6.408421703	5.337705666	5.33541	0.69102
22	7.590180705	6.388902325	5.322636786	5.34315	0.68414
24	7.559447916	6.423851644	5.324627971	5.33358	0.68758

追い波 船速	ピークスペクトル	ゼロアップクロス法		表示出会い周期	
	出会い周期	有義波出会い周期	平均出会い周期	平均	標準偏差
2	8.2821551	7.12418378	6.289918246	6.29862	0.70638
4	9.083087697	7.966890612	7.581930313	7.58553	0.69781
6	9.562808751	9.343470932	9.288010238	9.28675	0.67493
8	11.92686125	11.44796779	11.15938735	11.1422	0.82365
10	15.03556802	14.26625144	12.25244439	12.281	1.83848
12	18.57462387	17.88142857	11.66243798	11.6956	3.01553
14	23.11216242	19.31923091	9.876974577	9.93508	3.38249
16	30.29058984	17.67329489	8.065707562	8.15378	3.18991
18	171.2140963	14.82593451	6.687373034	6.76872	2.81199
20	567.739697	12.33797972	5.663933602	5.63281	2.28342
22	950.4383212	10.22857916	4.849101198	4.88604	1.90197
24	1109.305054	8.836941661	4.295621774	4.29044	1.58221

表 4.3 実験装置(使用加速度計一覧)

波高計 鶴見精機      マイクロ波式波高計 WM2型  
日本航空電子      ジンバル機構搭載サーボ加速度計 MA101型内蔵  
固定式加速度計 日本航空電子      サーボ加速度計 MA101型  
船首備え付け加速度計 日本航空電子      サーボ加速度計 JA5V型  
船体運動計測装置他

表 4.4 汐路丸要目

東京商船大学練習船 汐路丸  
総トン数      425 トン  
全長      49.93 m  
深さ      3.8 m  
型幅      10 m

表 4.5 データユニット別の平均値と最大値

ユニット 番号	日付	時刻	針路	船速 (k't)	真風向	真風速 (m/s)	有義 波高	最大 (m)
01	2000/3/8	12:42:54	238	7.73	244	15.7	2.76	3.44
02	2000/3/8	12:55:19	30	9.2	233	15.2	1.96	2.57
03	2000/3/8	13:09:07	348	11.22	231	16.77	2.13	2.5
04	2000/3/8	13:30:06	61	8.96	235	19.17	2.25	3.08
05	2000/3/8	14:06:53	272	9.51	235	15.22	0.9	1.71
06	2000/3/8	14:19:41	241	8.03	246	19.9	1.4	1.97
07	2000/3/8	14:50:19	230	7.59	250	20.62	1.87	2.6
08	2000/3/8	15:05:35	21	5.63	241	18.98	1.87	2.81
09	2000/3/8	11:19:21	230	11.82	239	8.62	0.64	0.98
10	2000/3/8	12:10:38	180	10.13	249	15.37	2.85	4.32
11	2000/3/9	9:59:09	310	11.07	287	15.87	2.3	2.98
12	2000/3/9	10:31:09	20	13.13	255	13.18	2.38	2.8
13	2000/3/9	12:34:56	41	13.87	26	10.82	1.07	1.58

ユニット 番号	船首備付 加速度	最大 (g)	ジンバル式 加速度	最大 (g)	固定式 加速度	最大 (g)
01	0.06875	0.19781	0.05733	0.1926	0.04832	0.1876
02	0.04076	-0.0813	0.0264	-0.0812	0.02567	-0.091
03	0.08181	-0.1806	0.06635	-0.1721	0.06246	0.1729
04	0.04616	-0.0907	0.02814	-0.0954	0.0244	-0.096
05	0.12676	-0.3891	0.11688	-0.3734	0.12346	-0.99
06	0.24228	-0.5024	0.2428	0.74143	0.24119	1.008
07	0.21452	-0.5267	0.20248	-0.5065	0.19918	0.4916
08	0.09807	-0.216	0.08046	-0.2027	0.06793	-0.206
09	0.12733	-0.2499	0.11374	0.24134	0.10556	0.228
10	0.32598	0.77567	0.31837	0.78555	0.34418	1.0143
11	0.23425	-0.4985	0.24024	1.24343	0.23933	1.0143
12	0.05764	-0.1214	0.04149	0.13738	0.03799	-0.129
13	0.02115	-0.0546	0.01788	0.06678	0.02058	0.0703

ユニット 番号	ロール (度)	最大	ピッチ (度)	最大
01	4.24	7.53	1.24	2.66
02	2.51	-5	0.84	-1.82
03	5.12	9.92	1.12	-2.65
04	2.09	-5.37	1.07	2.1
05	1.51	-1.7	0.92	-1.74
06	0.61	-1.83	1.49	-2.69
07	0.87	-1.98	1.31	2.77
08	6.32	14.59	1.29	-2.76
09	0.77	1.45	0.8	-1.21
10	2.79	-8.5	1.68	4.43
11	3.24	7.42	1.31	2.38
12	1.92	-3.28	0.94	-1.65
13	0.46	-1.19	0.15	-0.36

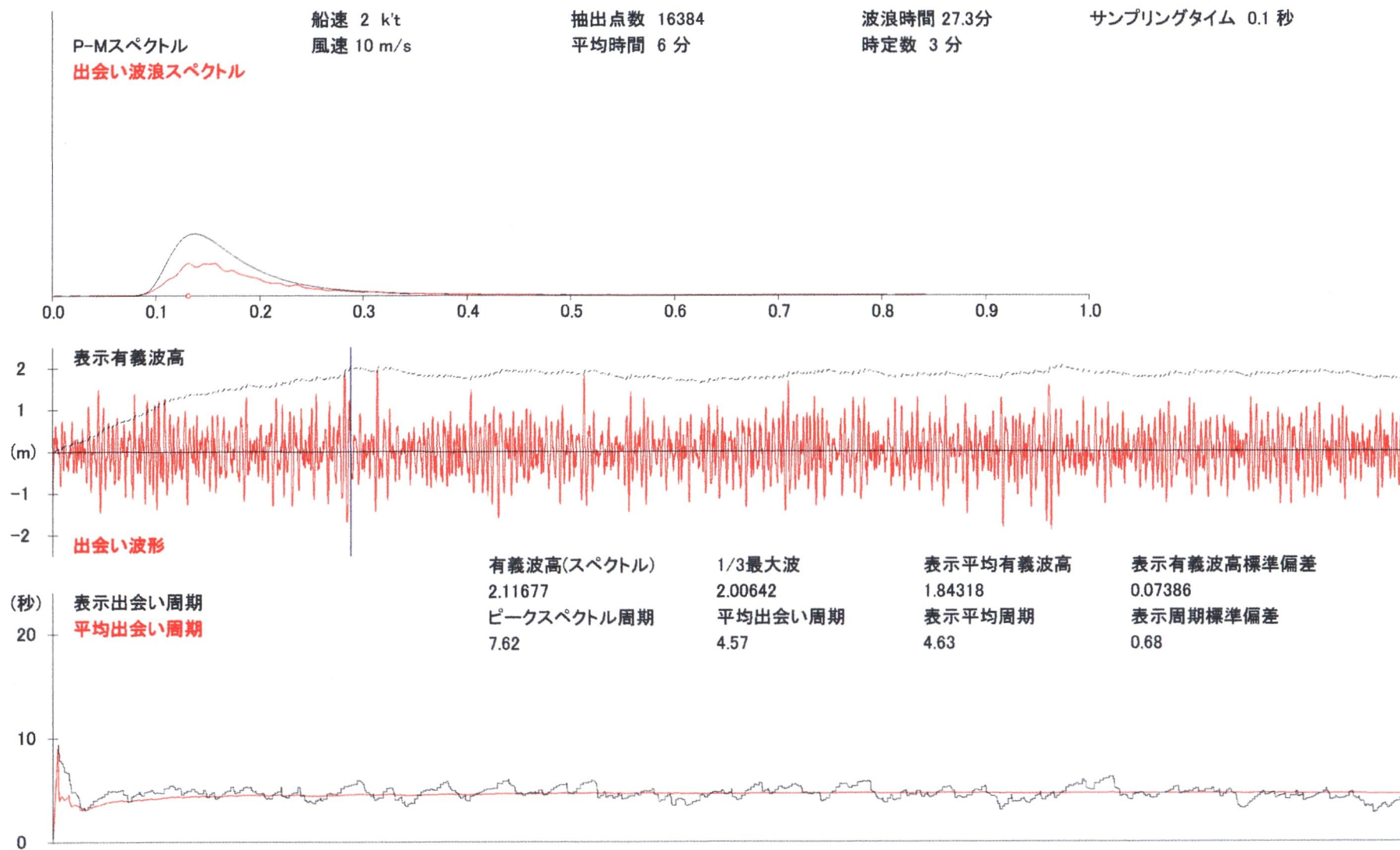


図 4.1 (a) 船速 2 k/t 向波でのスペクトル、出会い波形および平均出会い周期

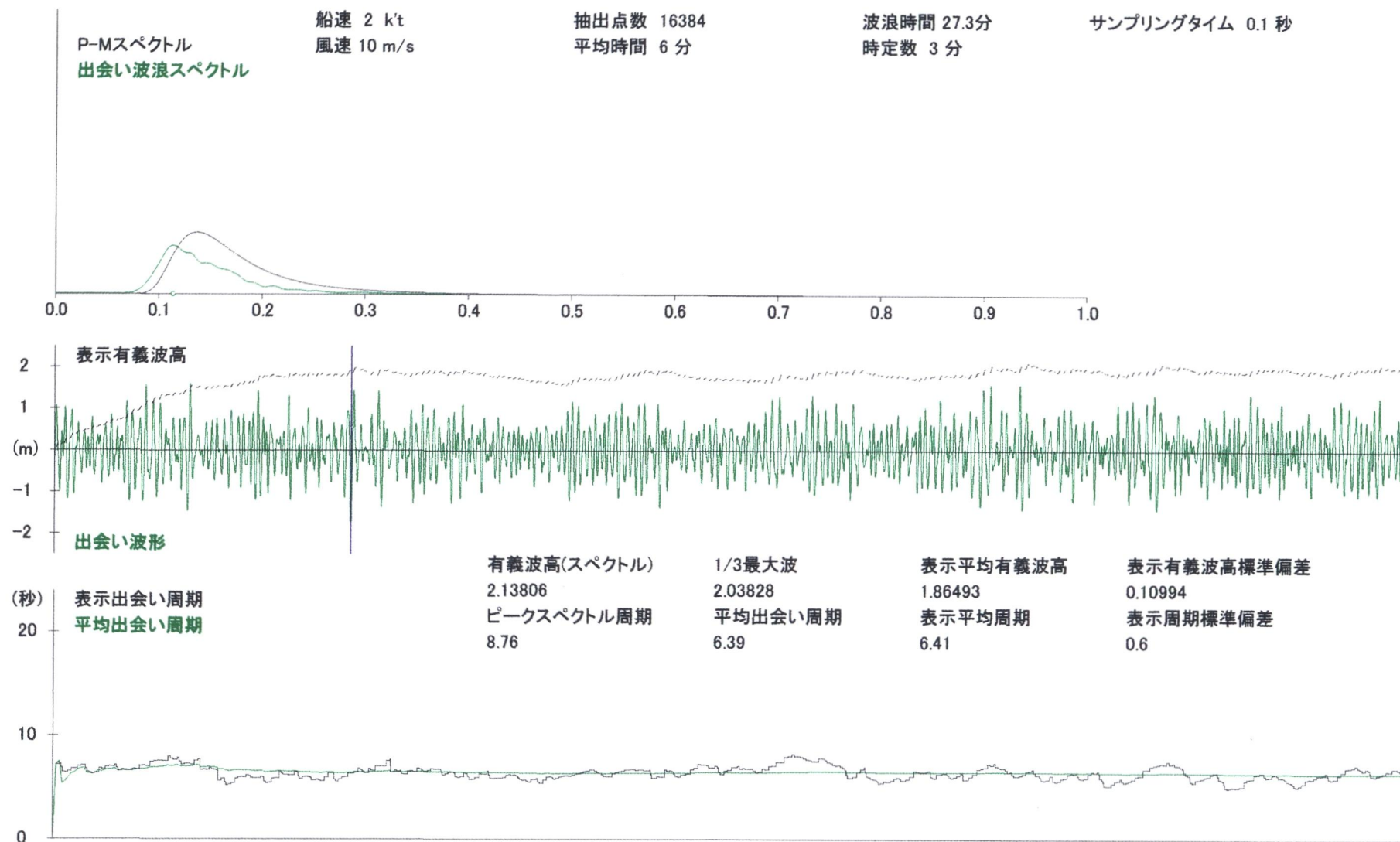


図 4.1 (b) 船速 2 k/t 追い波でのスペクトル、出会い波形および平均出会い周期

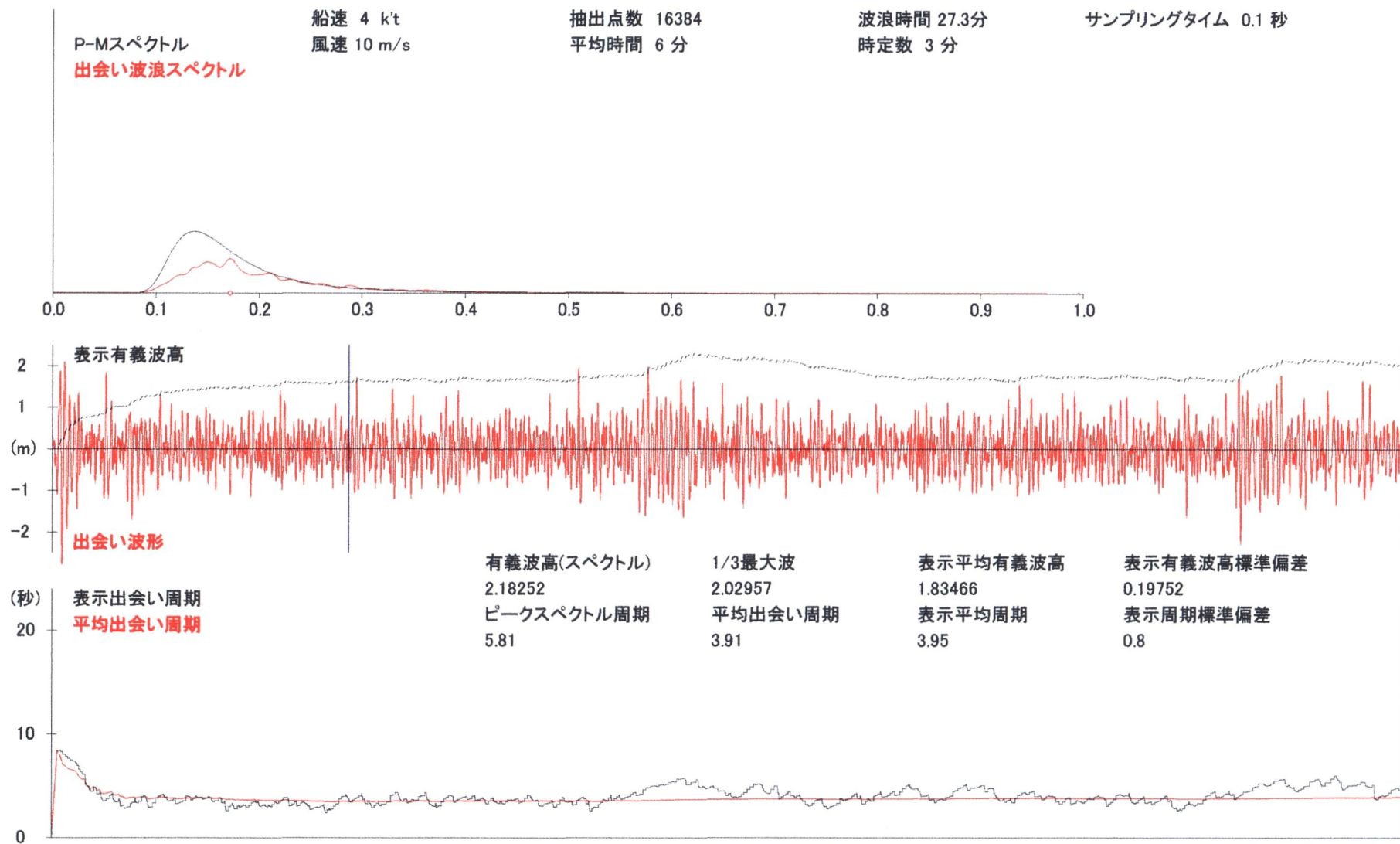


図 4.2 (a) 船速 4 kt 向波でのスペクトル、出会い波形および平均出会い周期



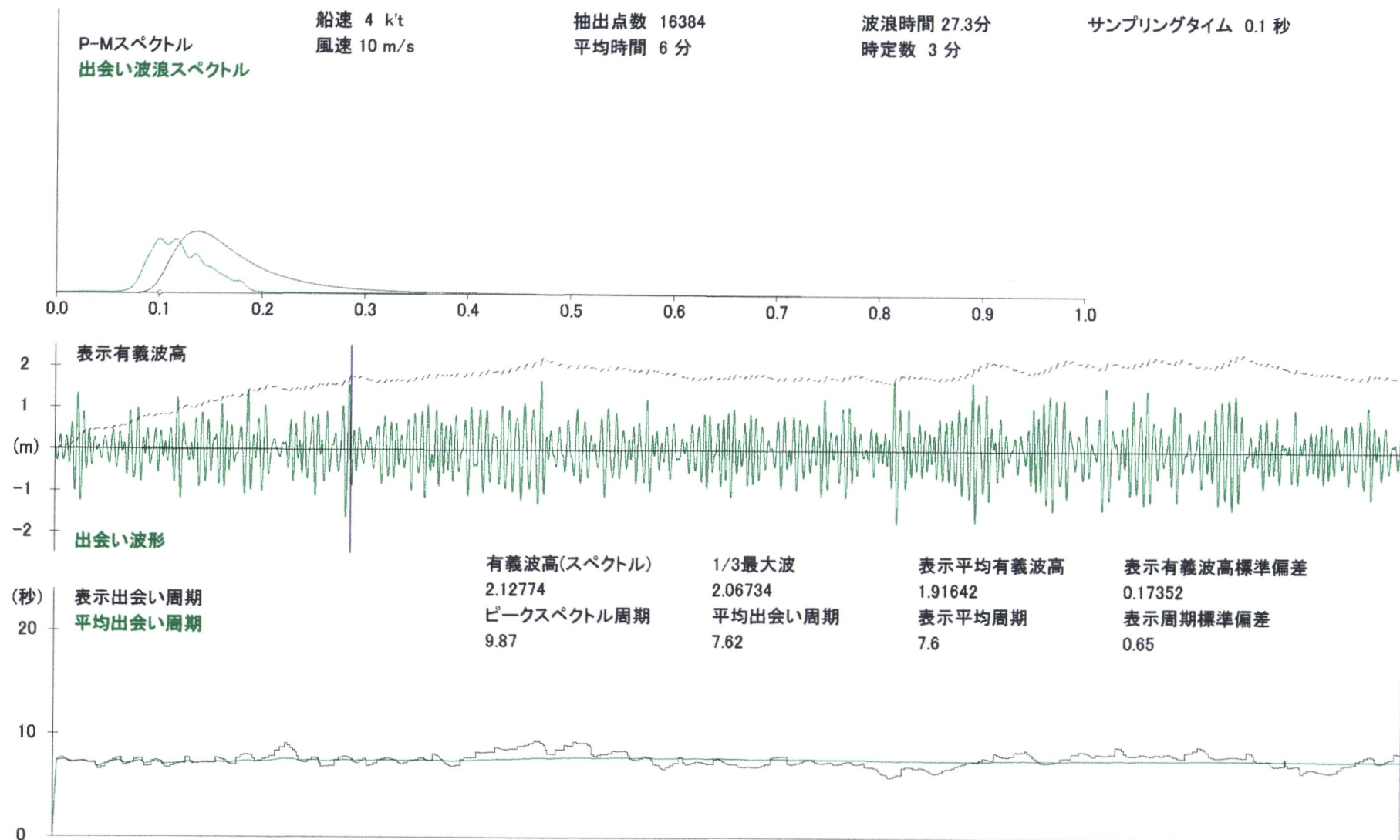


図 4.2 (b) 船速 4 kt 追い波でのスペクトル、出会い波形および平均出会い周期



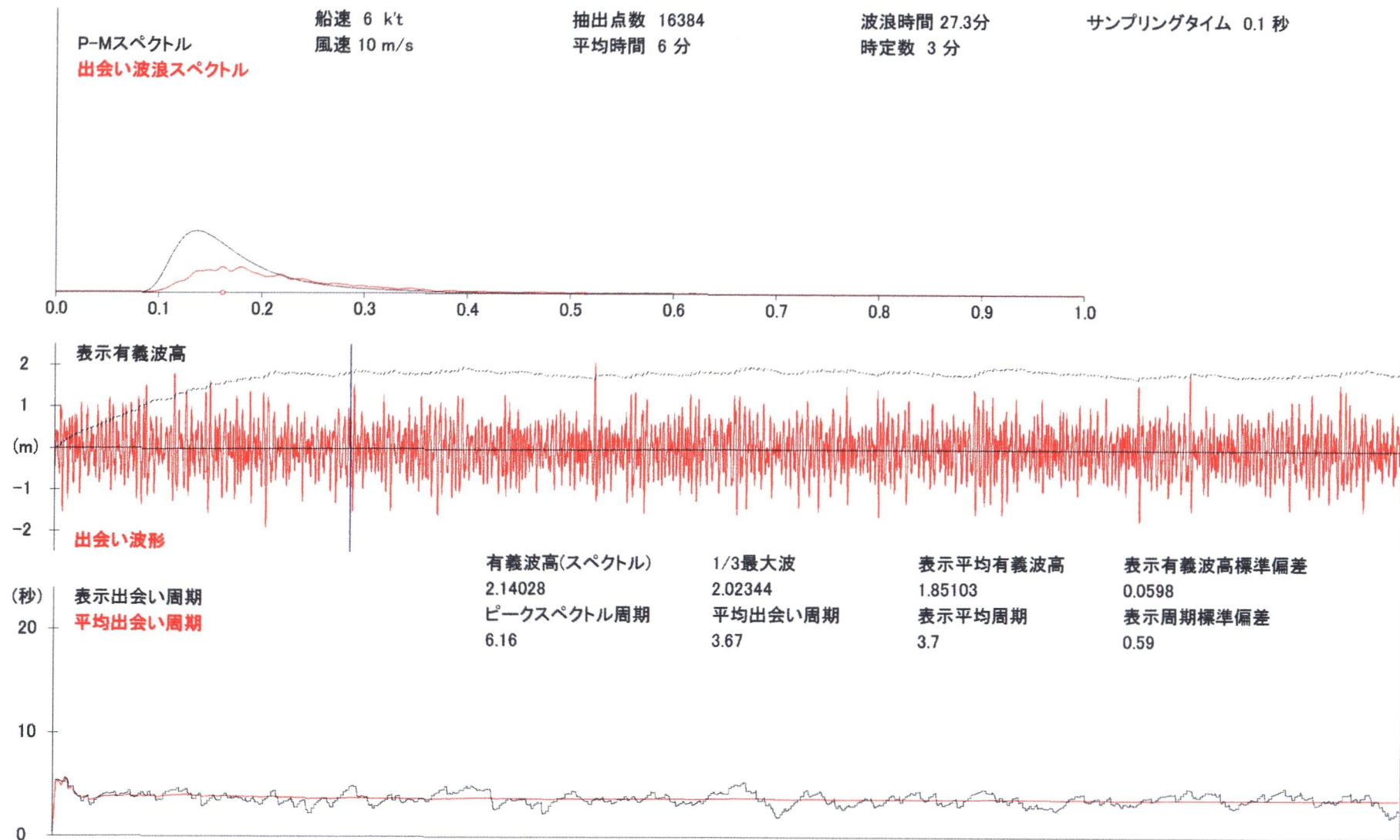


図 4.3 (a) 船速 6 kt 向波でのスペクトル、出会い波形および平均出会い周期

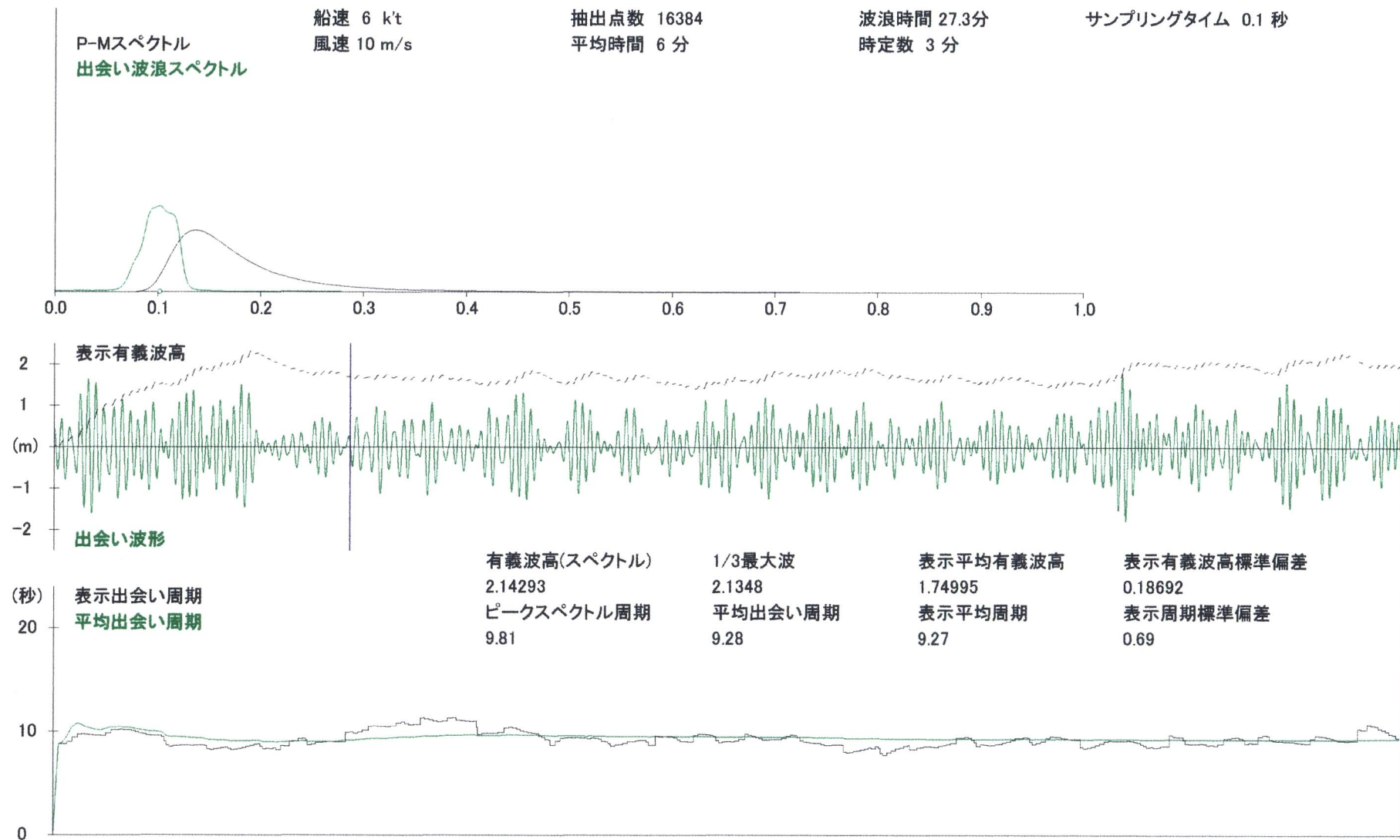


図 4.3 (b) 船速 6 kt 追い波でのスペクトル、出会い波形および平均出会い周期

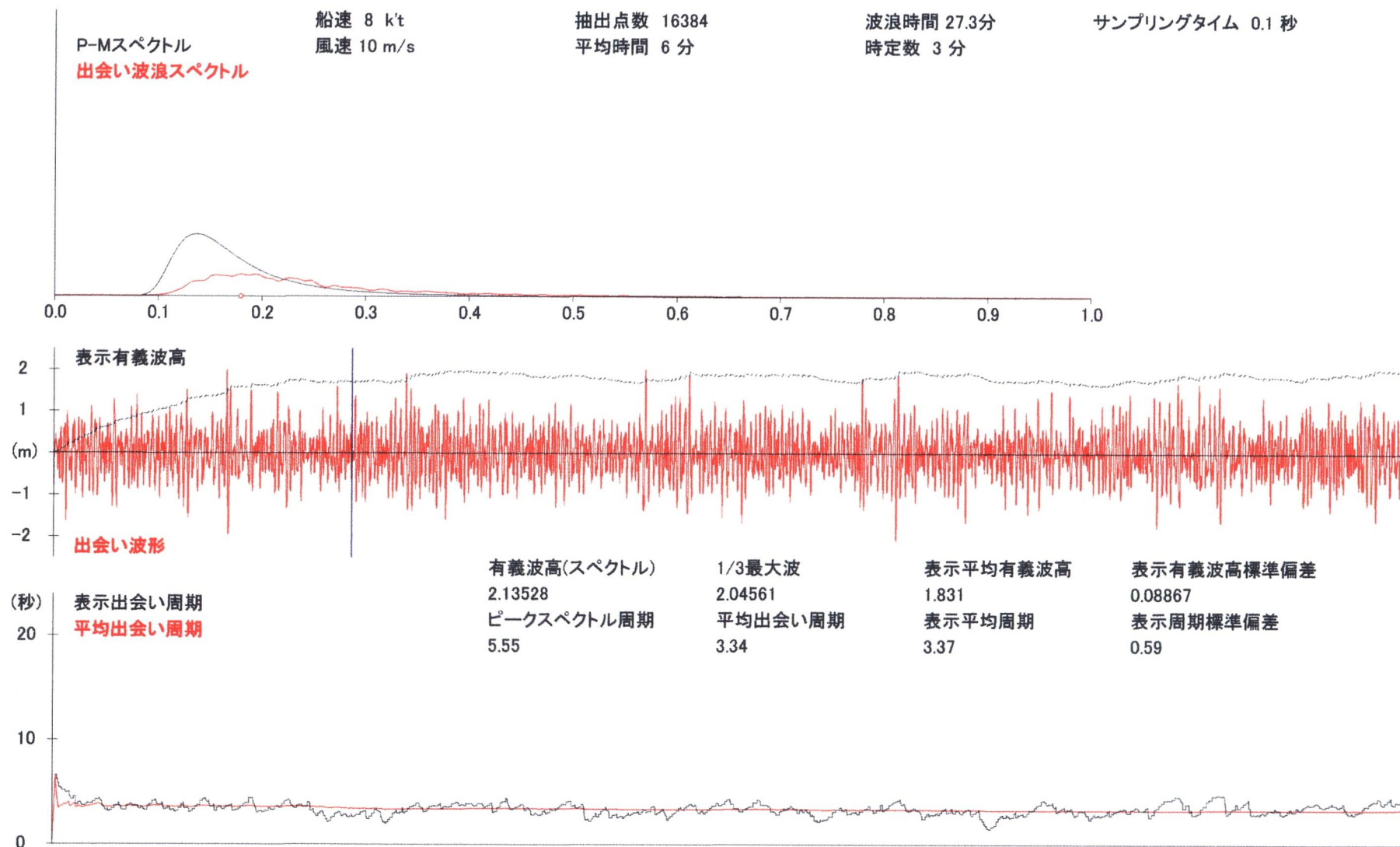


図 4.4 (a) 船速 8 k/t 向波でのスペクトル、出会い波形および平均出会い周期

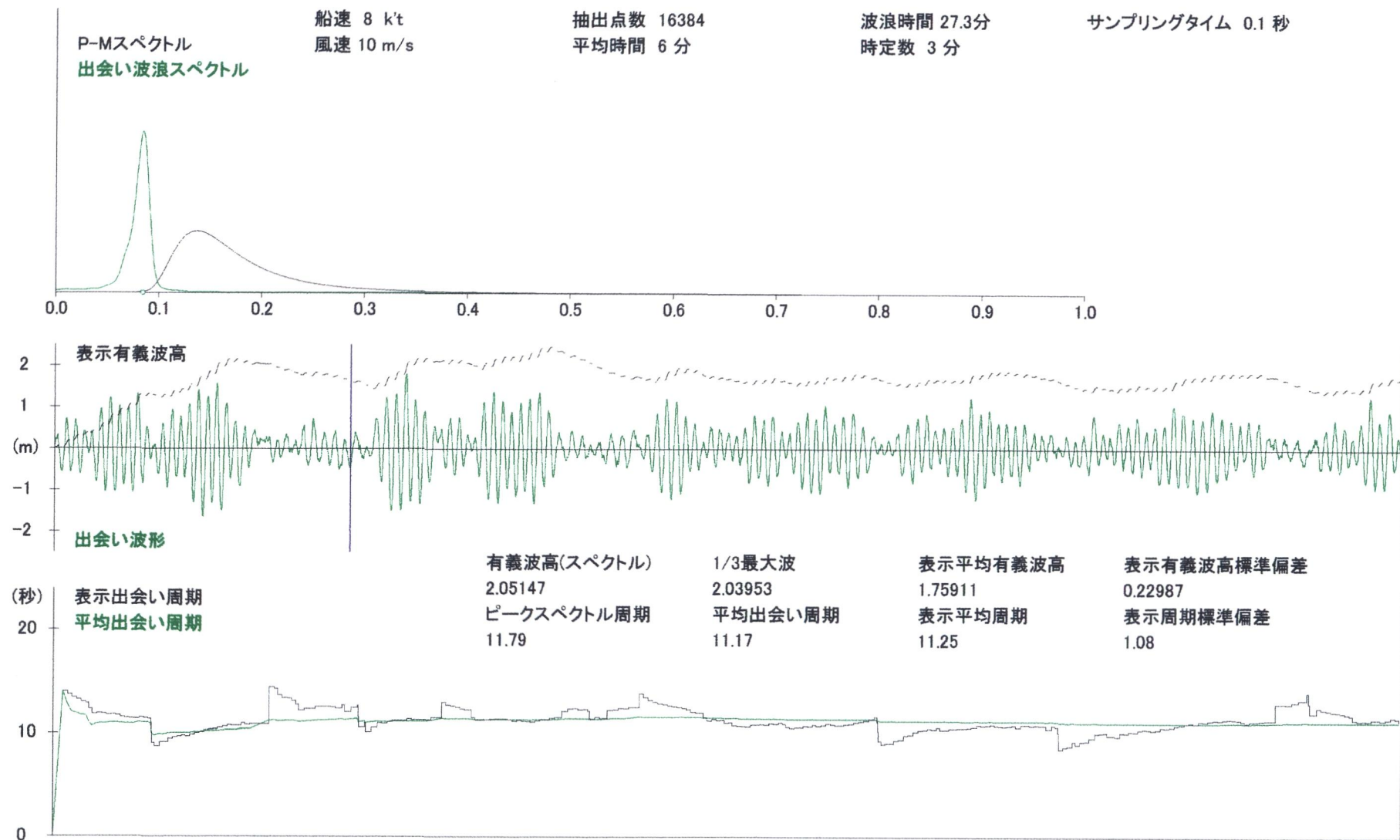


図 4.4 (b) 船速 8 k't 追い波でのスペクトル、出会い波形および平均出義周期



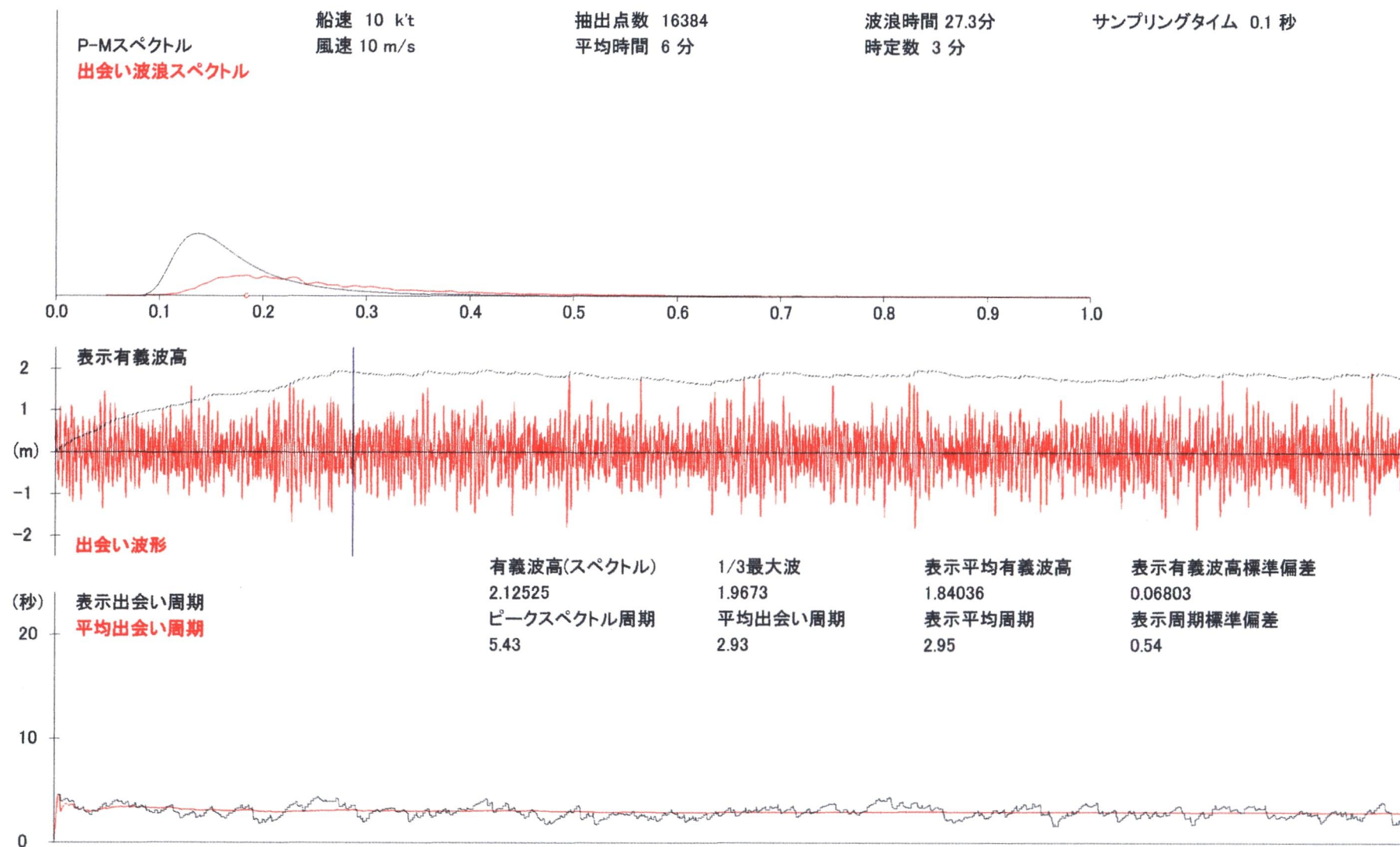


図 4.5 (a) 船速 10 k/t 向波でのスペクトル、出会い波形および平均出会い周期

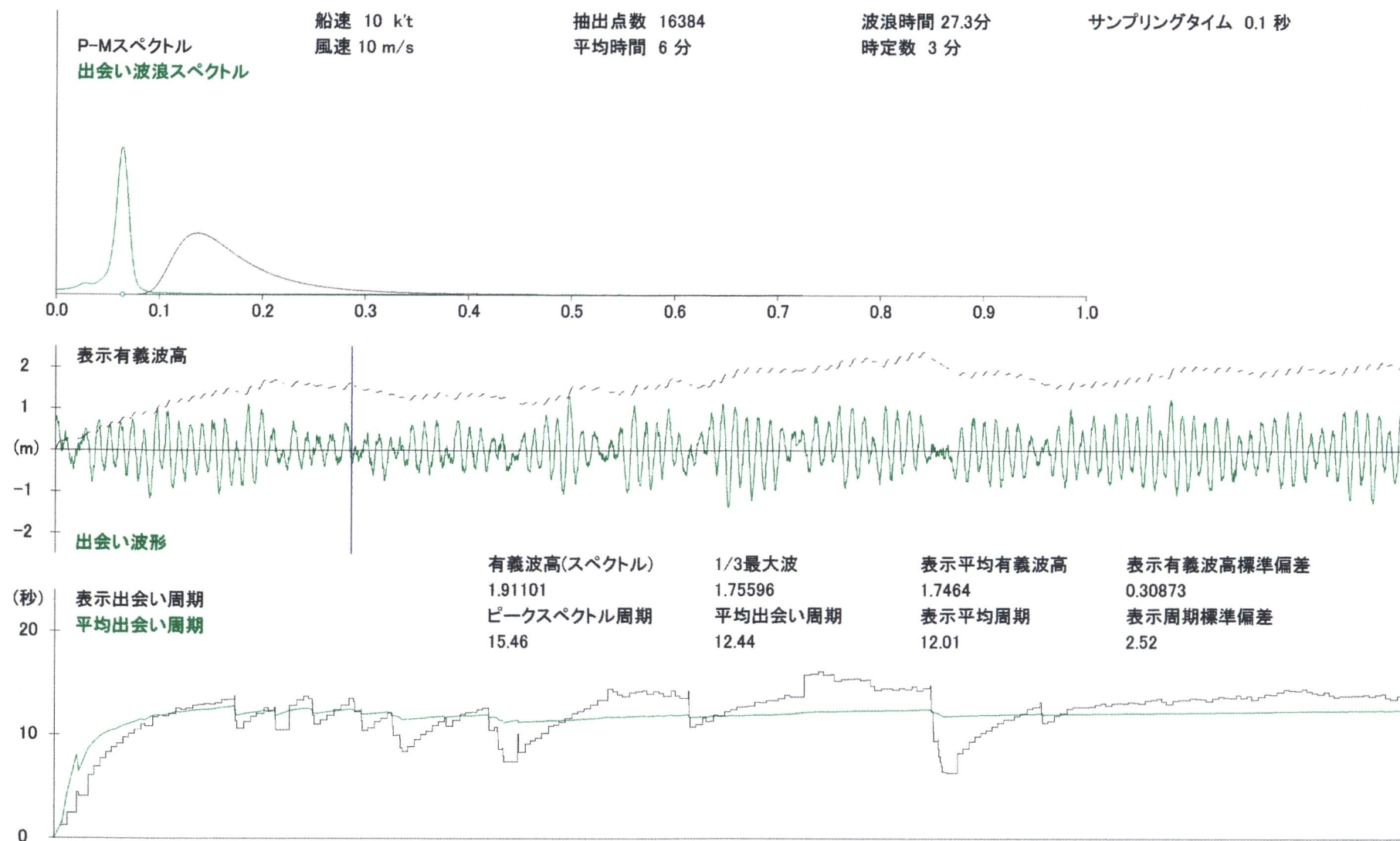


図 4.5 (b) 船速 10 k't 追い波でのスペクトル、出会い波形および平均出会い周期

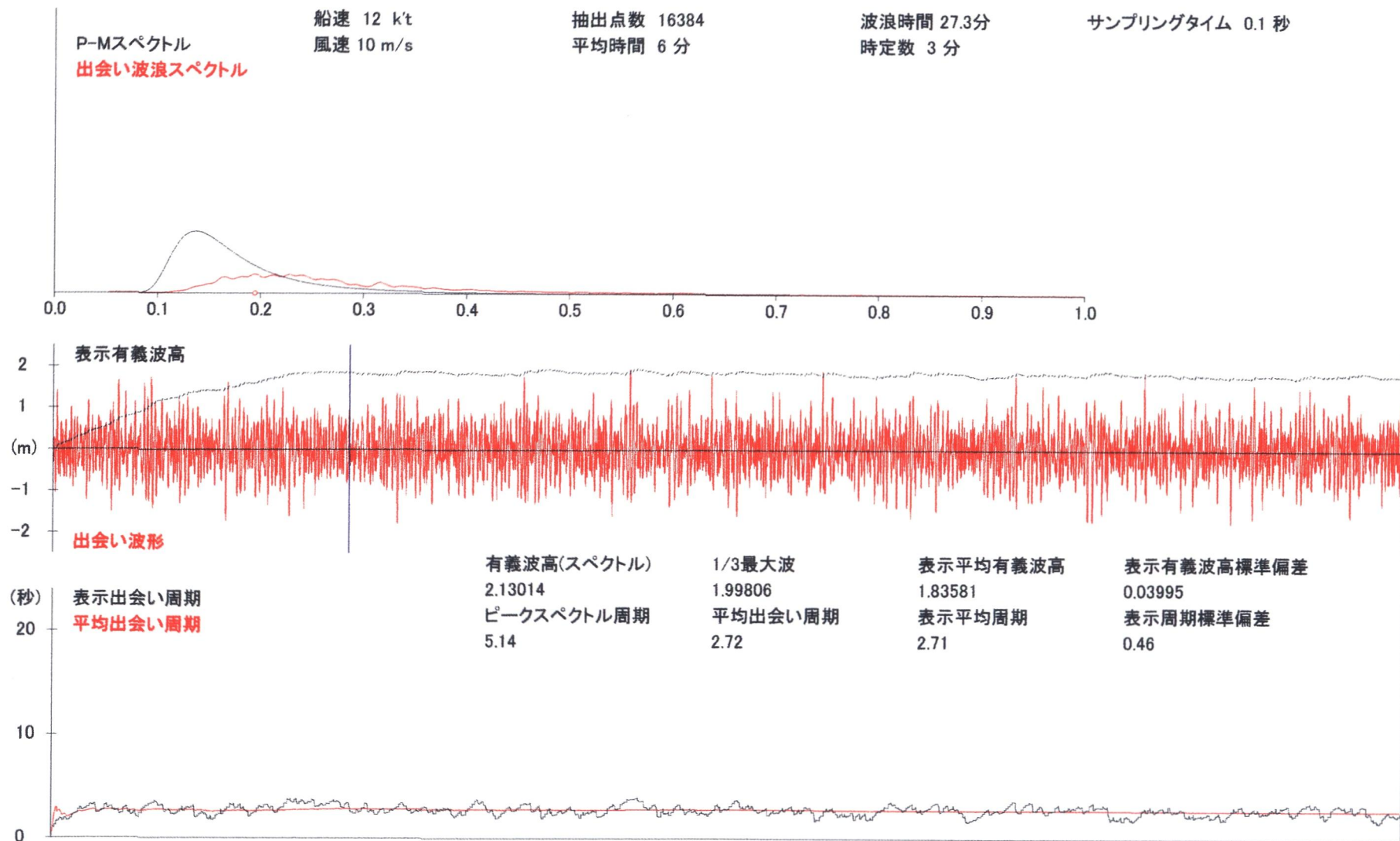


図 4.6 (a) 船速 12 k/t 向波でのスペクトル、出会い波形および平均出会い周期

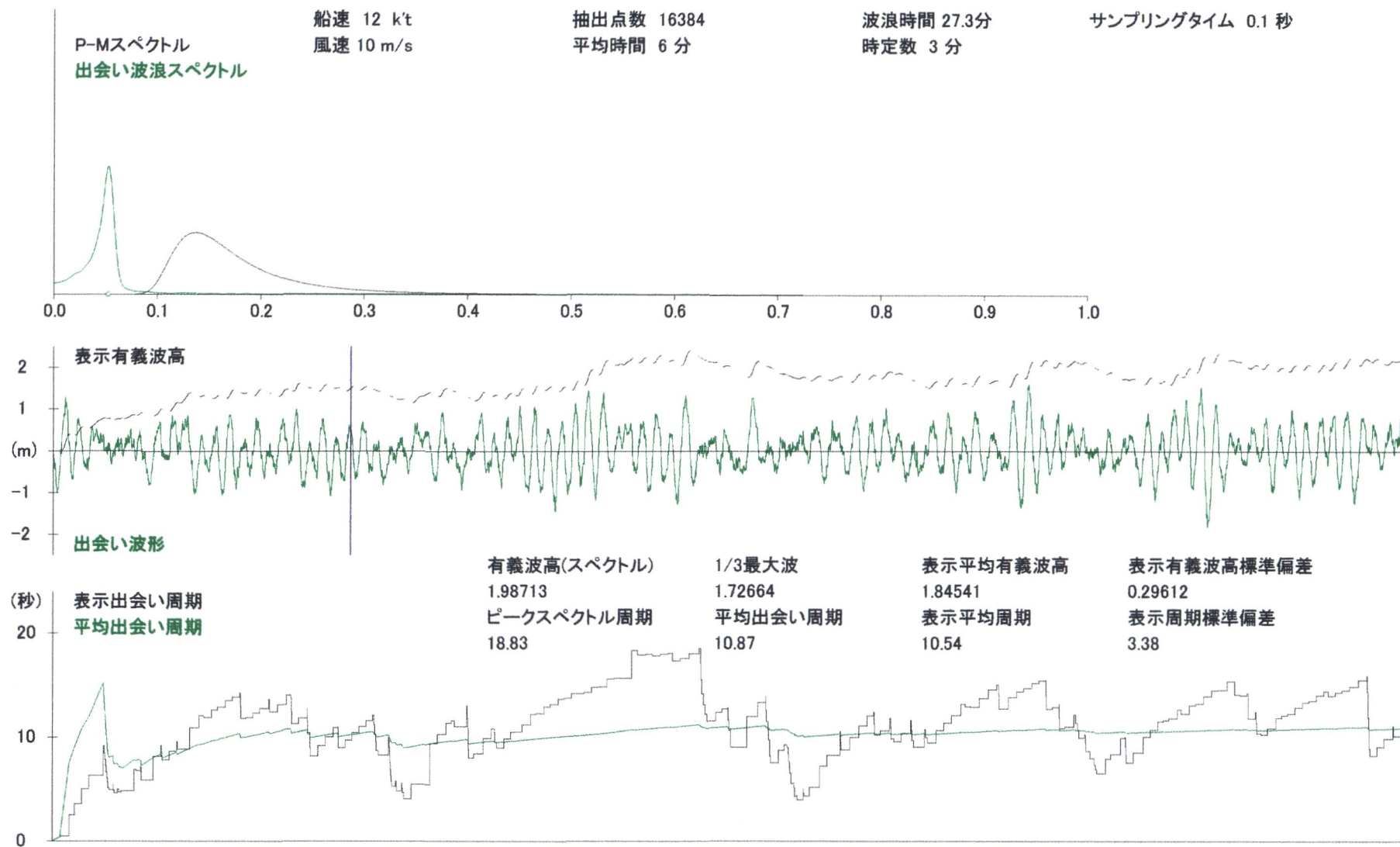


図 4.6 (b) 船速 12 k/t 追い波でのスペクトル、出会い波形および平均出会い周期



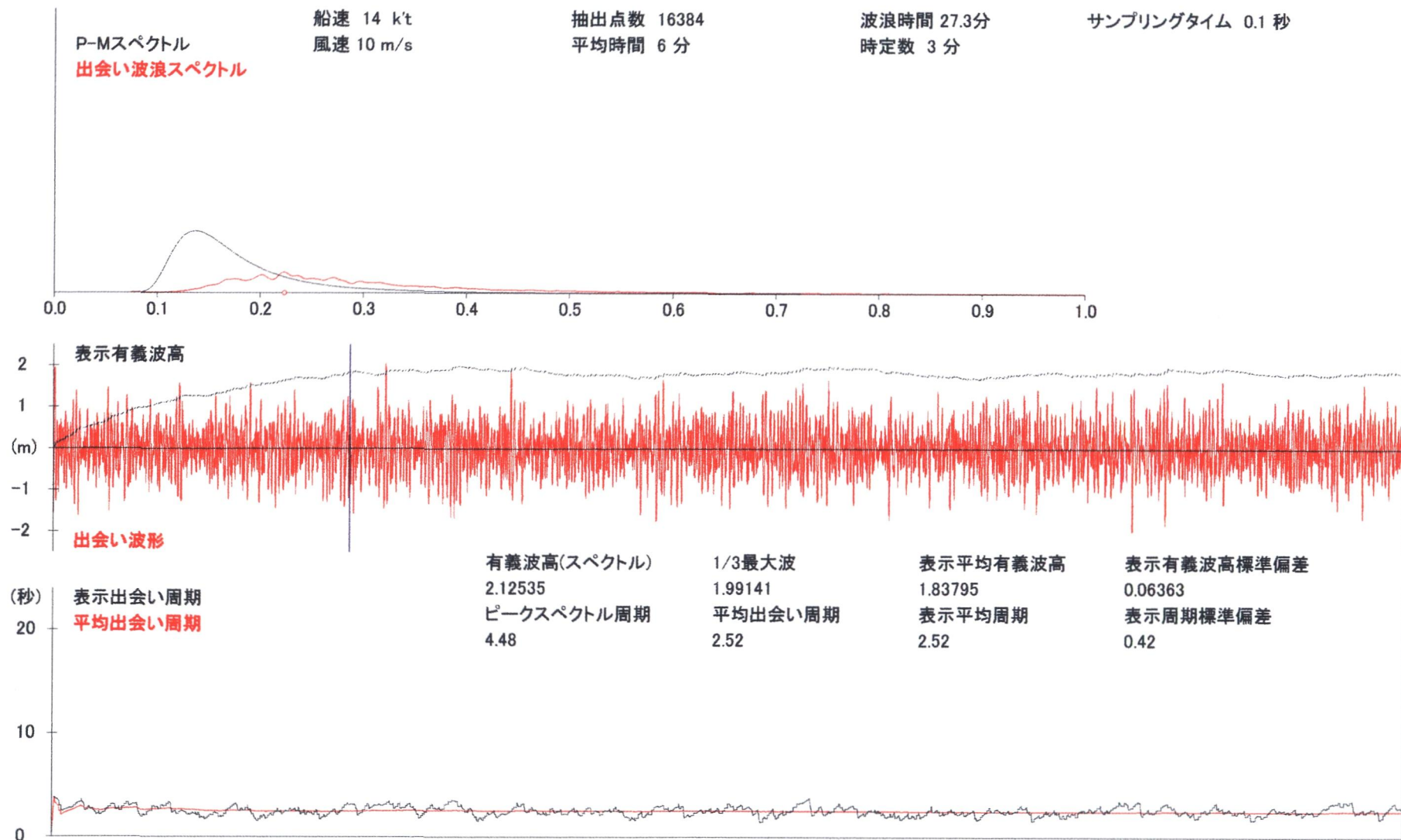


図 4.7 (a) 船速 14 k/t 向波でのスペクトル、出会い波形および平均出会い周期

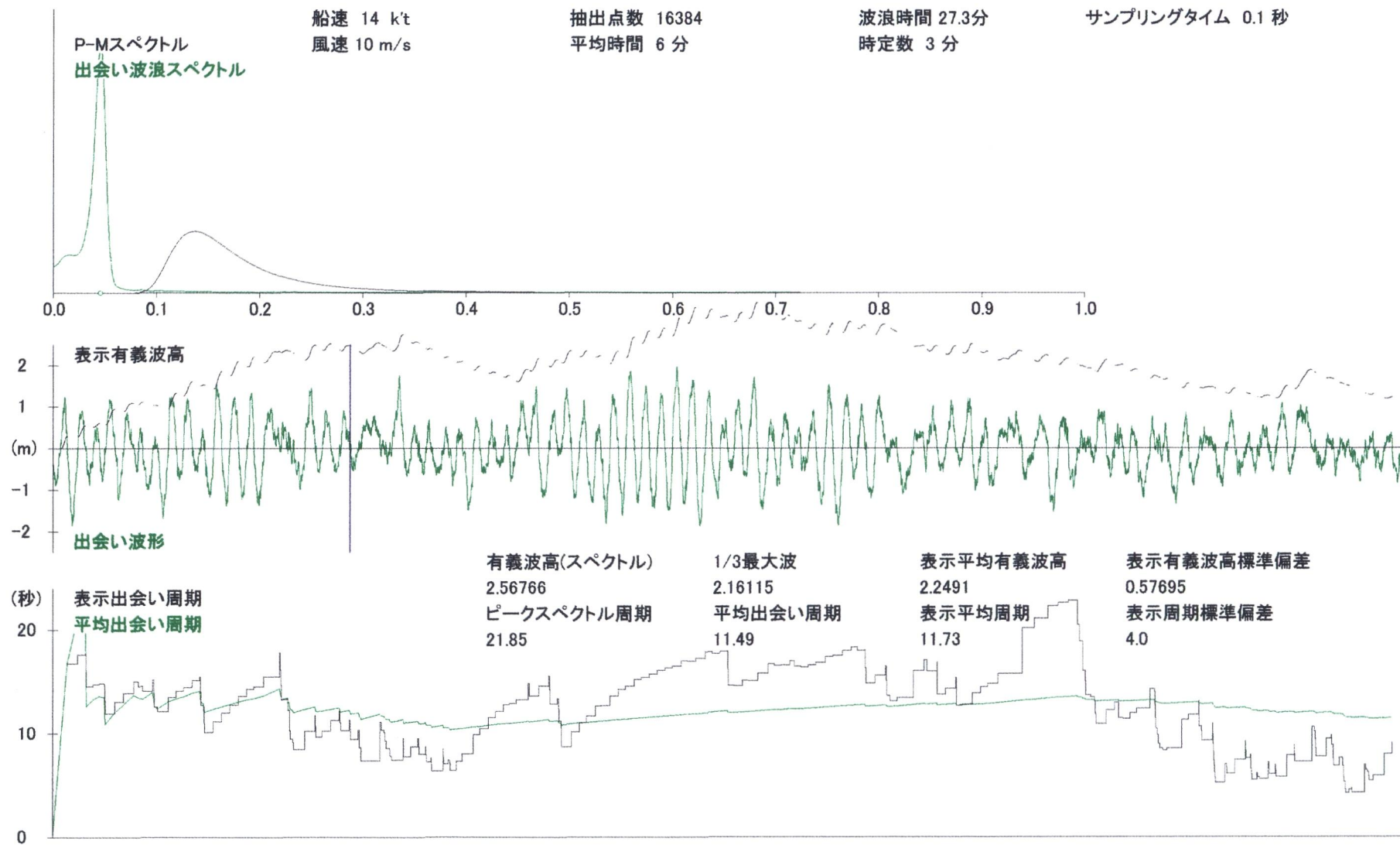


図 4.7 (b) 船速 14 kt 追い波でのスペクトル、出会い波形および平均出会い周期

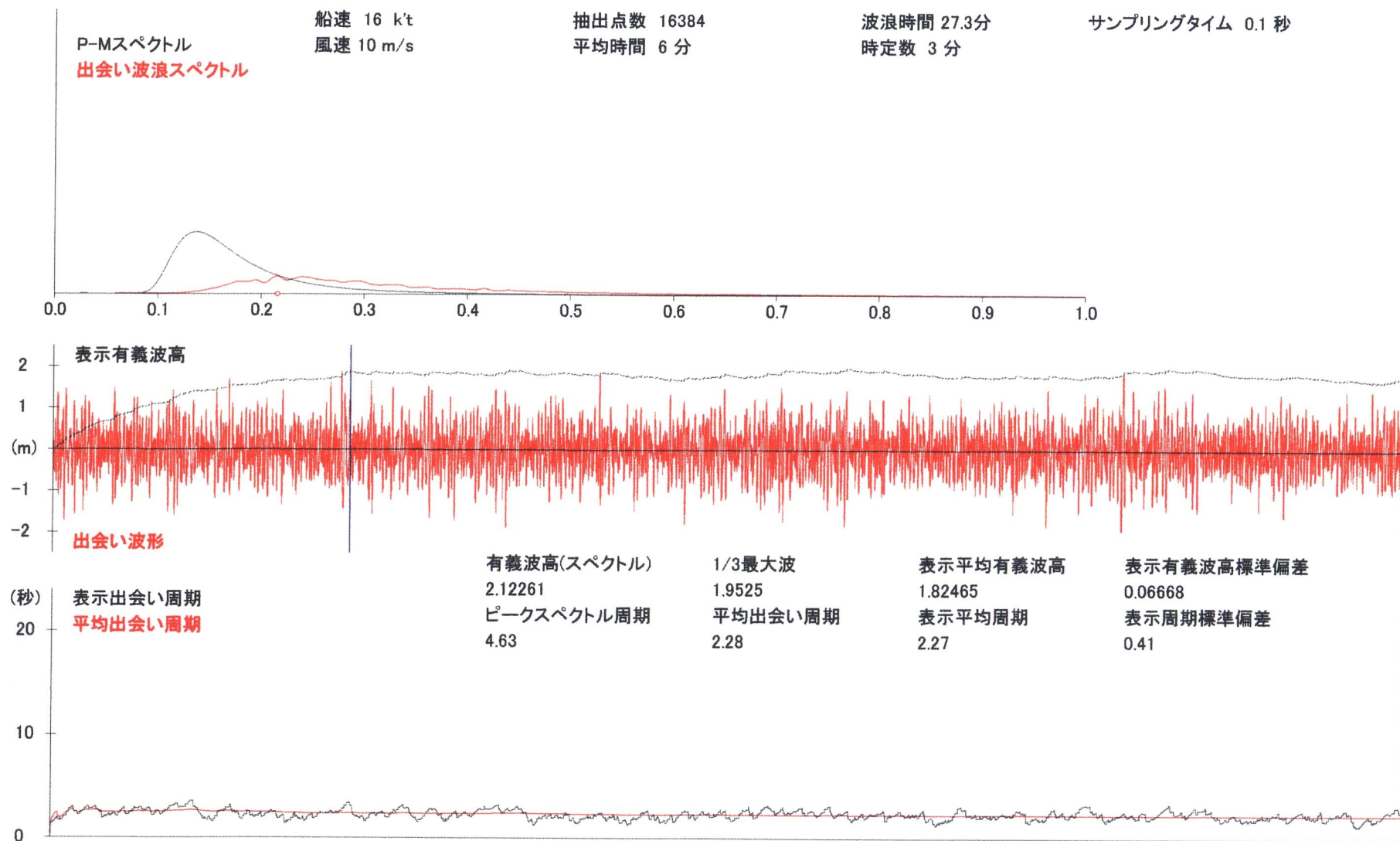


図 4.8 (a) 船速 16 k/t 向波でのスペクトル、出会い波形および平均出会い周期

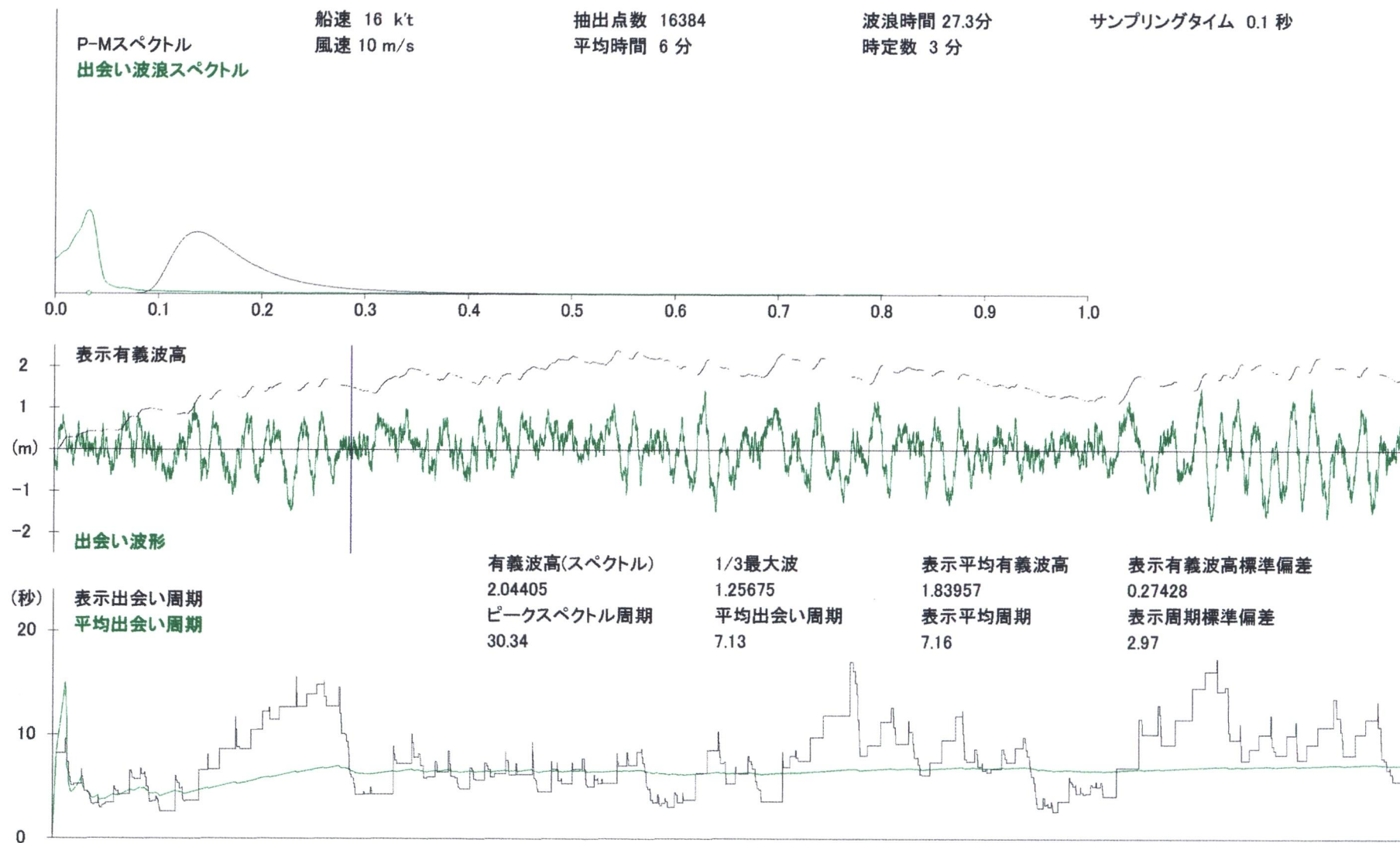


図 4.8 (b) 船速 16 k/t 追い波でのスペクトル、出会い波形および平均出会い周期



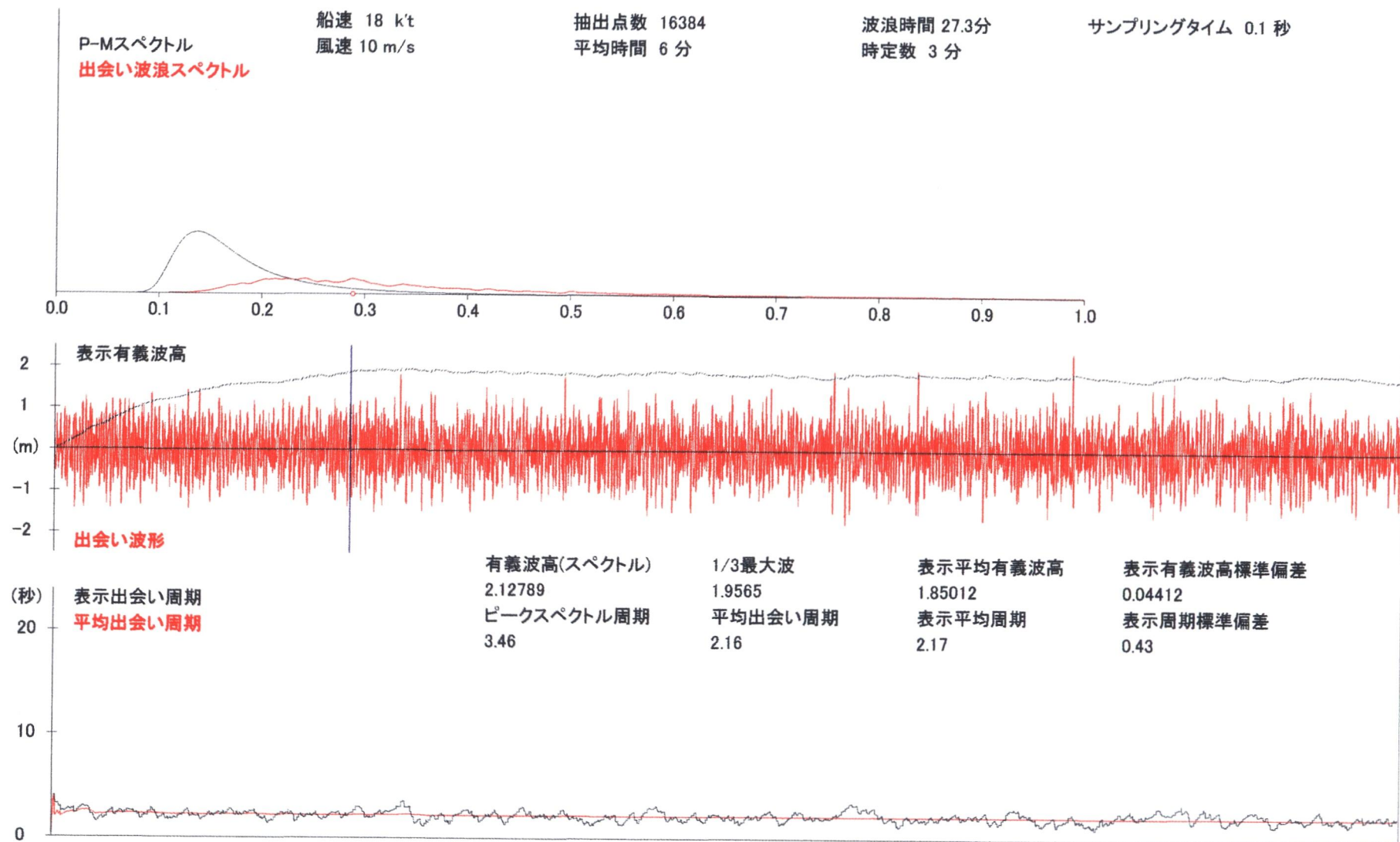


図 4.9 (a) 船速 18 k/t 向波でのスペクトル、出会い波形および平均出会い周期

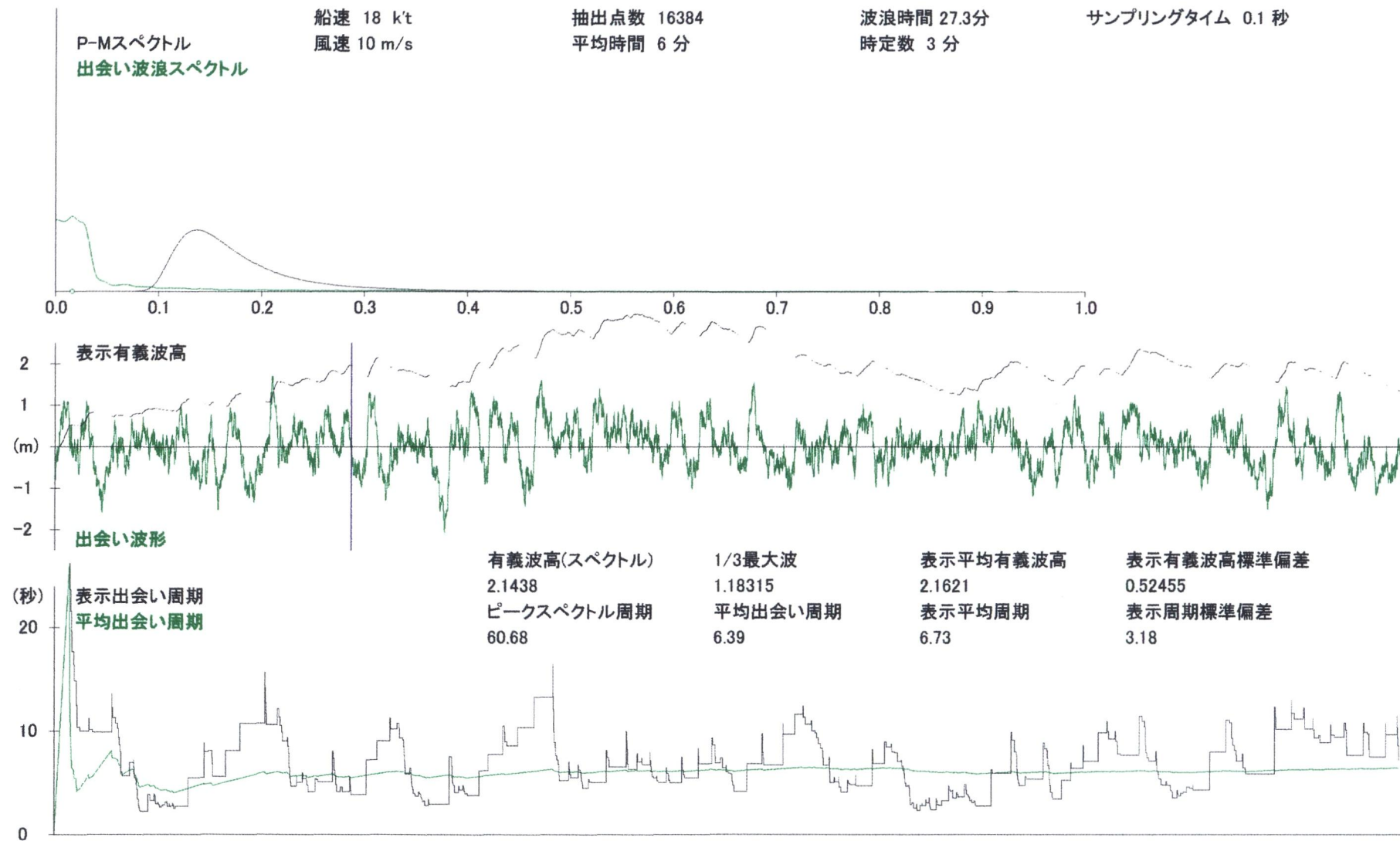


図 4.9 (b) 船速 18 kt 追い波でのスペクトル、出会い波形および平均出会い周期

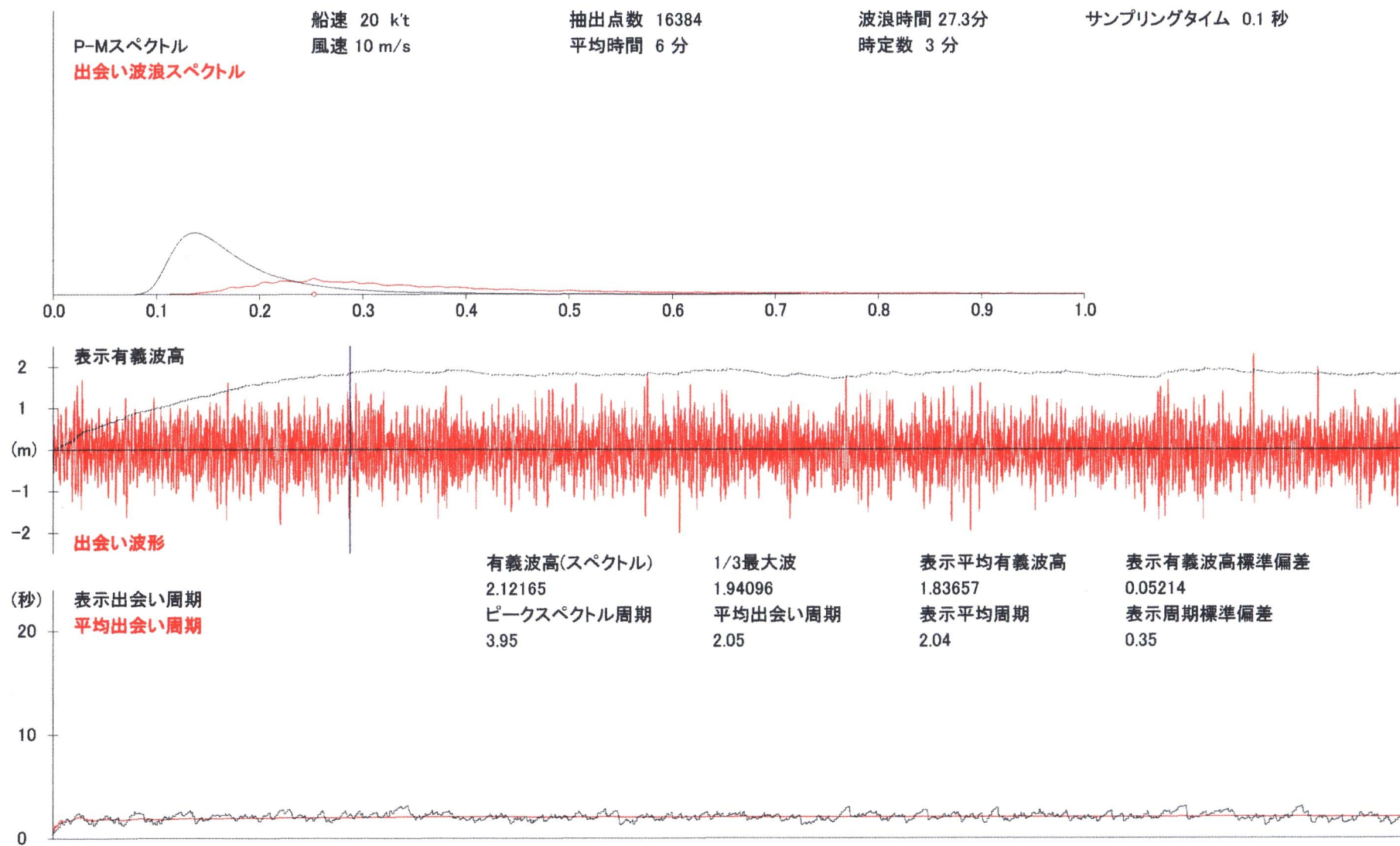


図 4. 10 (a) 船速 20 kt 向波でのスペクトル、出会い波形および平均出会い周期

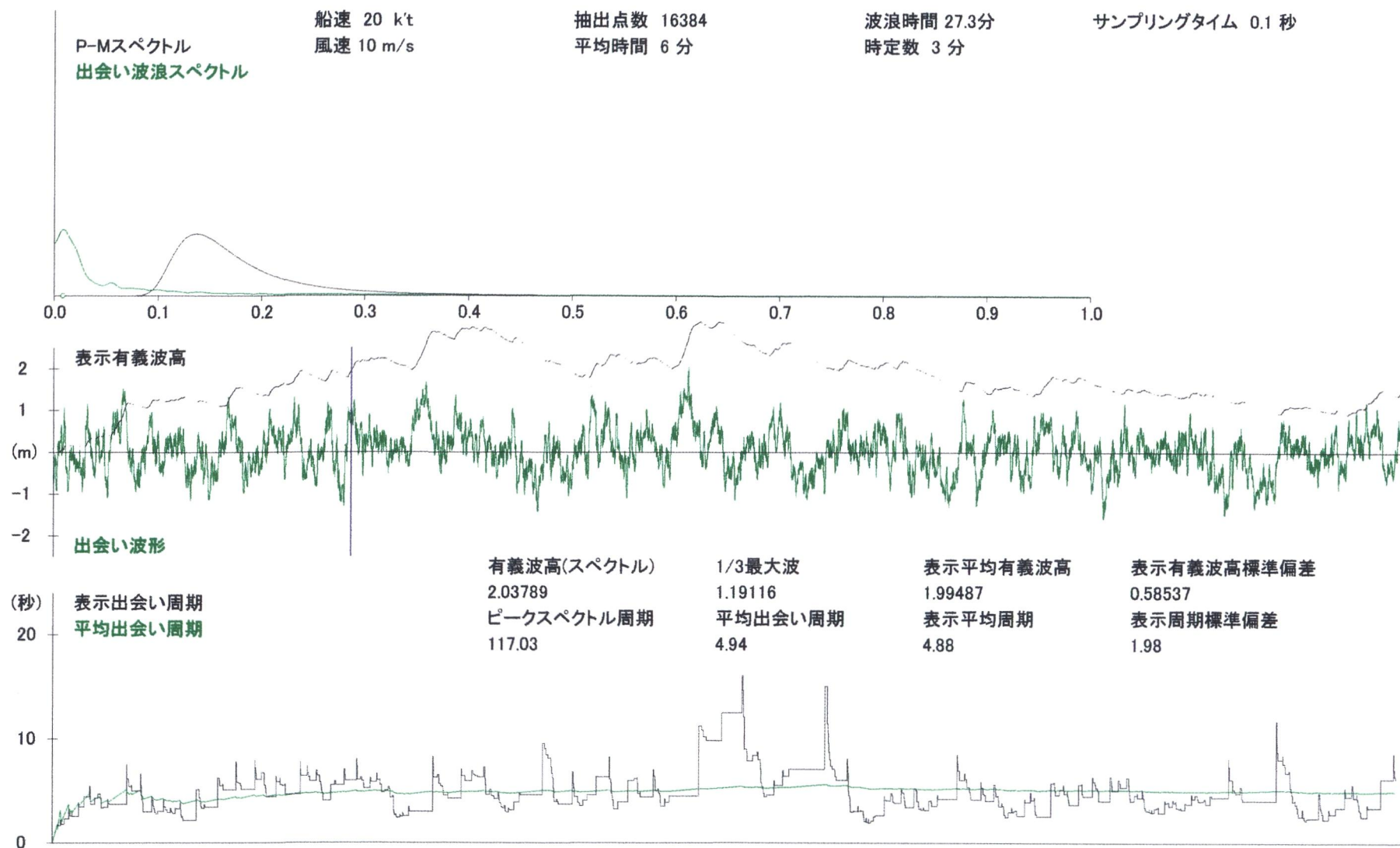


図 4. 10 (b) 船速 20 k/t 追い波でのスペクトル、出会い波形および平均出会い周期



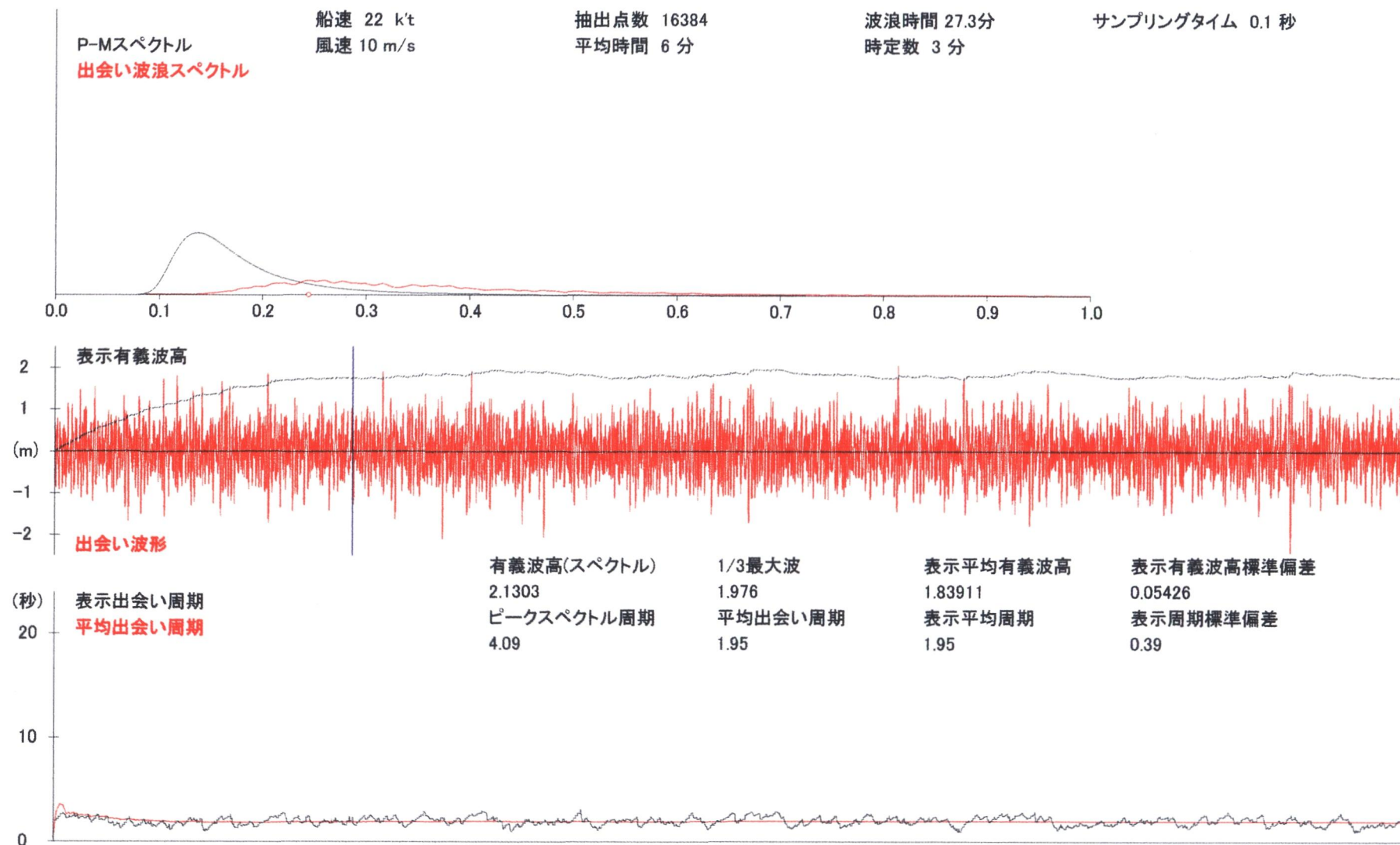


図 4. 11 (a) 船速 22 k/t 向波でのスペクトル、出会い波形および平均出会い周期

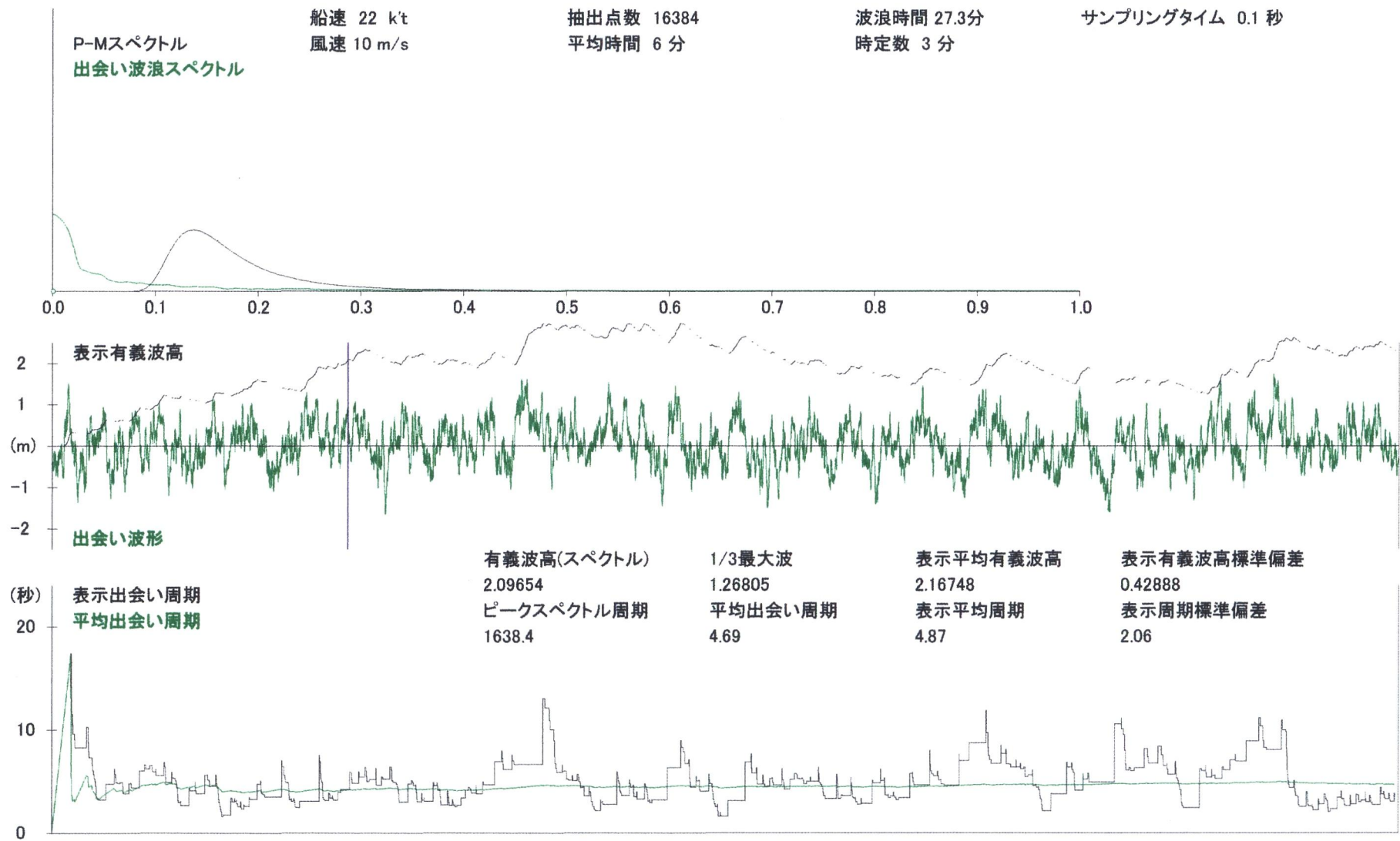


図 4. 11 (b) 船速 22 kt 追い波でのスペクトル、出会い波形および平均出会い周期

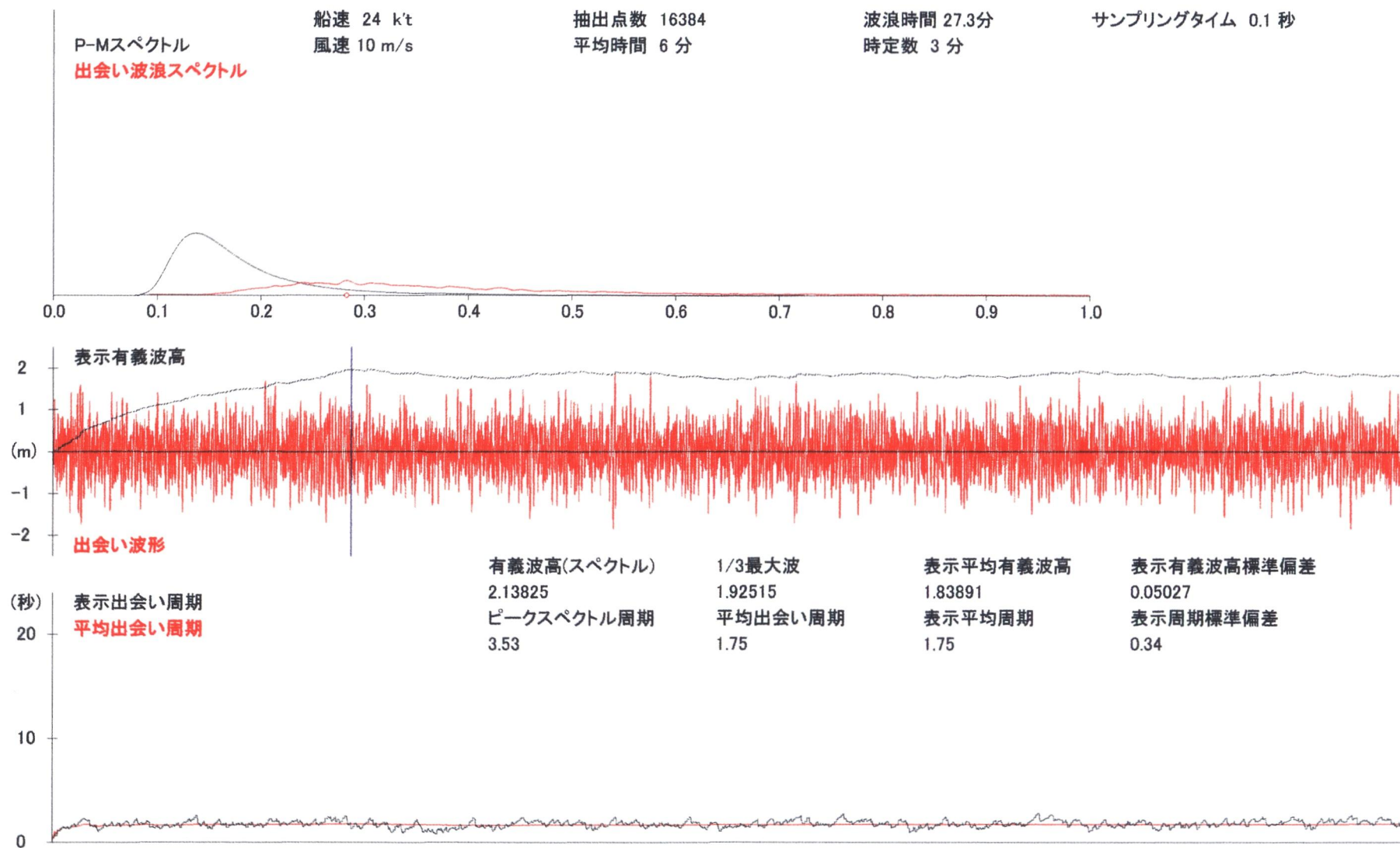


図 4. 12 (a) 船速 24 k/t 向波でのスペクトル、出会い波形および平均出会い周期

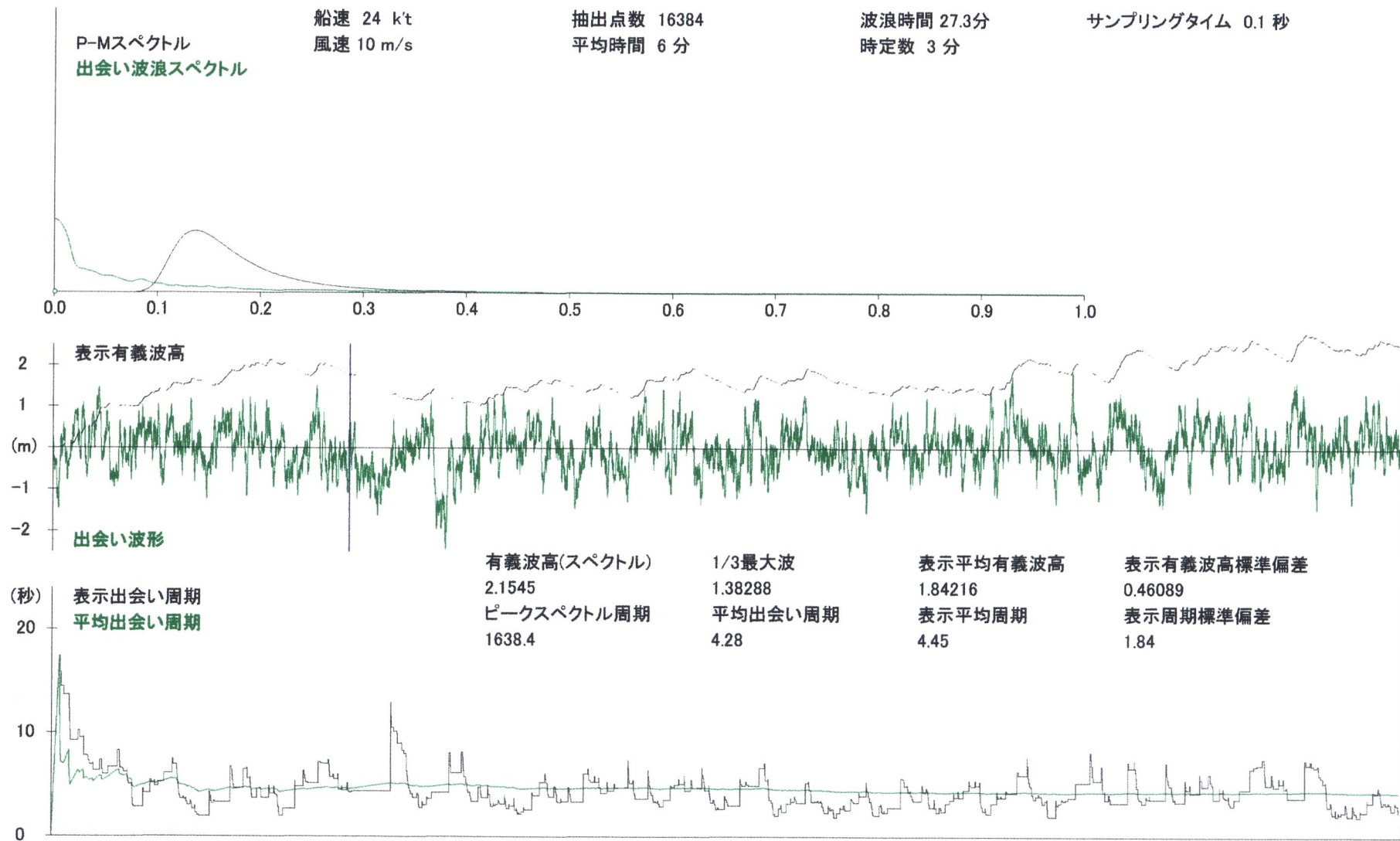


図 4. 12 (b) 船速 24 k/t 追い波でのスペクトル、出会い波形および平均出会い周期



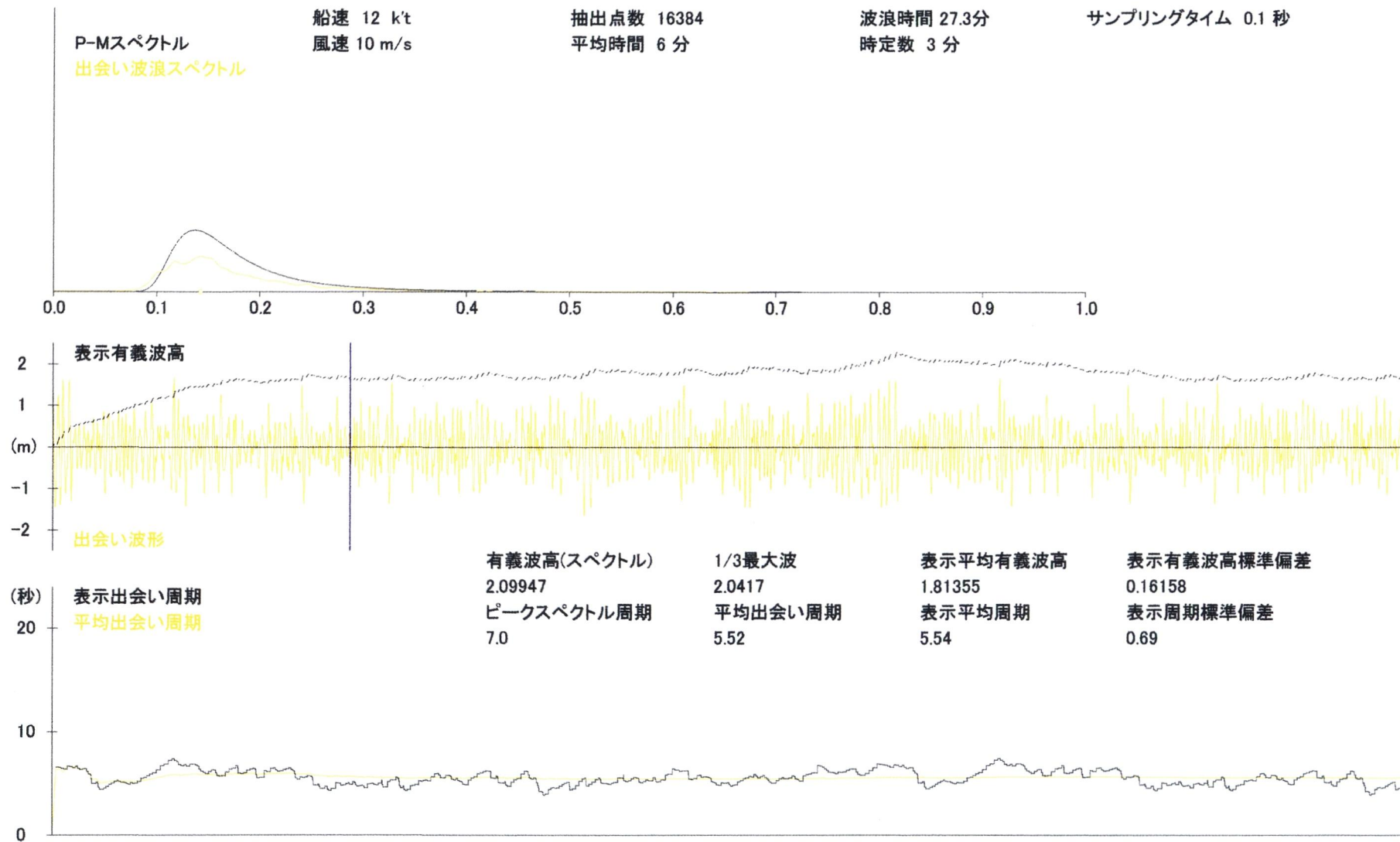


図 4.13 横波でのスペクトル、出会い波形および平均出会い周期

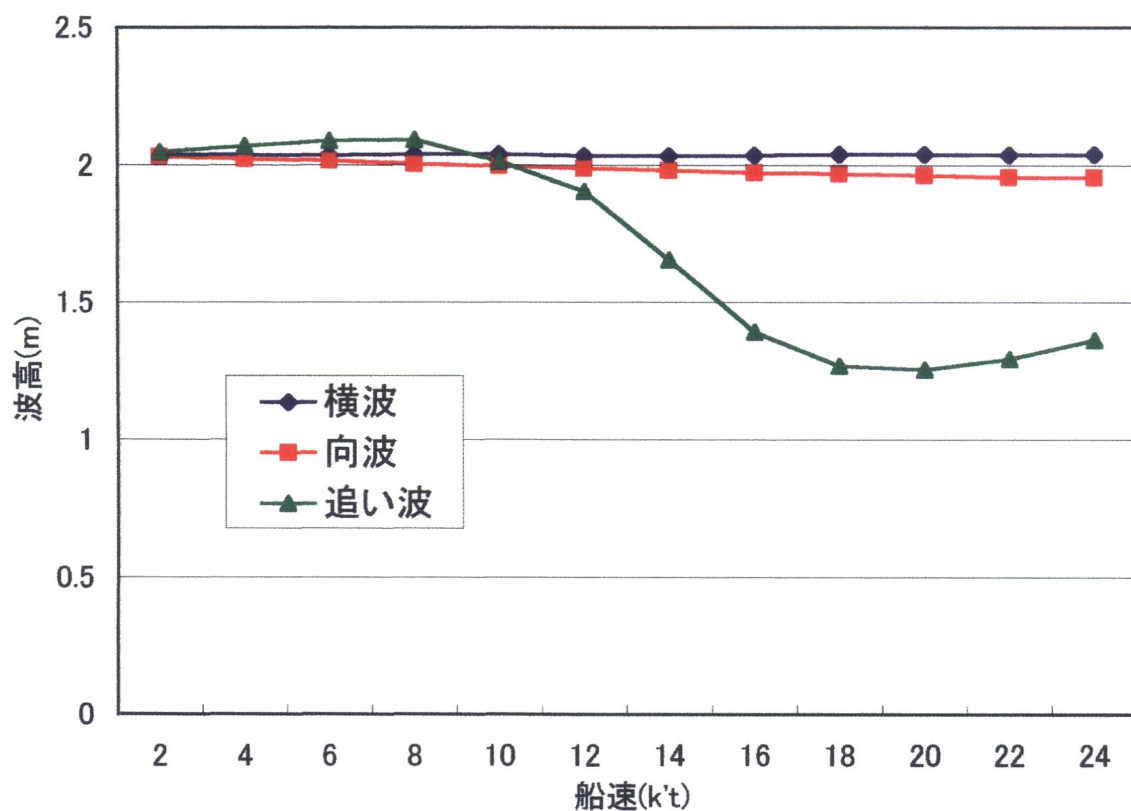


図 4.14 ゼロアップクロス法による1/3最大波高

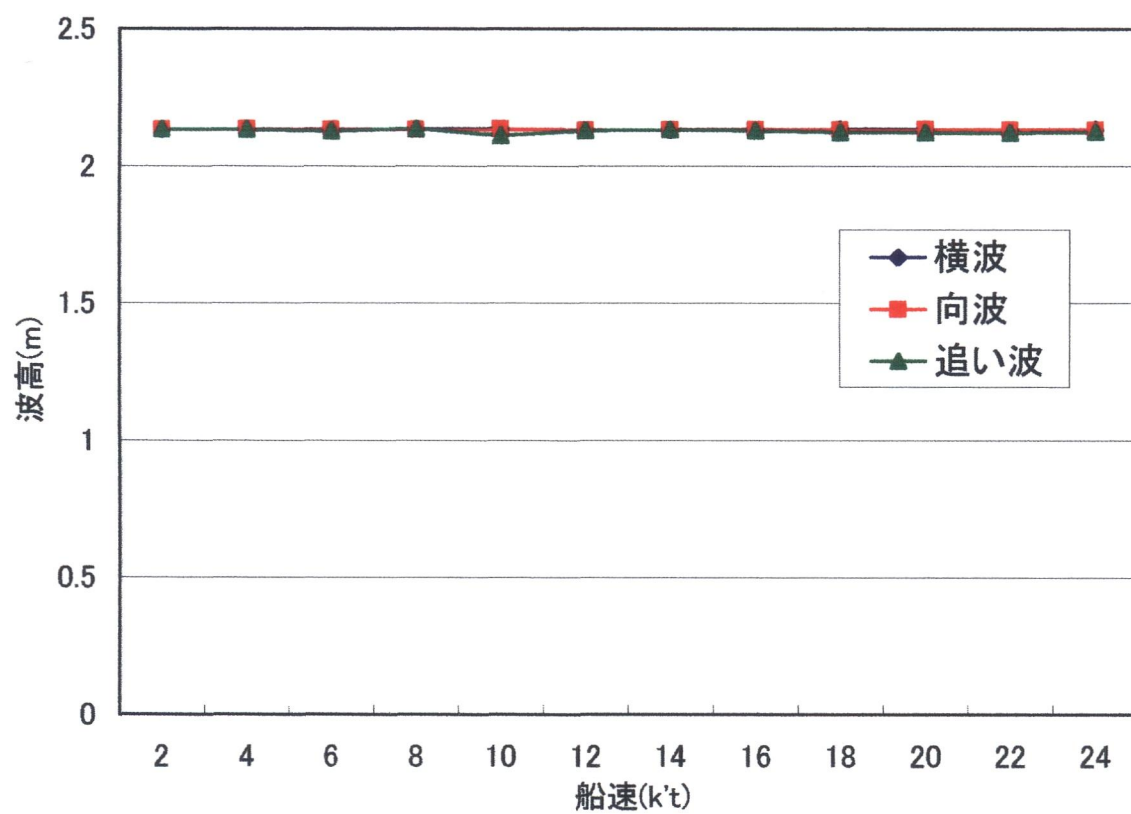


図 4.15 スペクトルからの換算有義波高

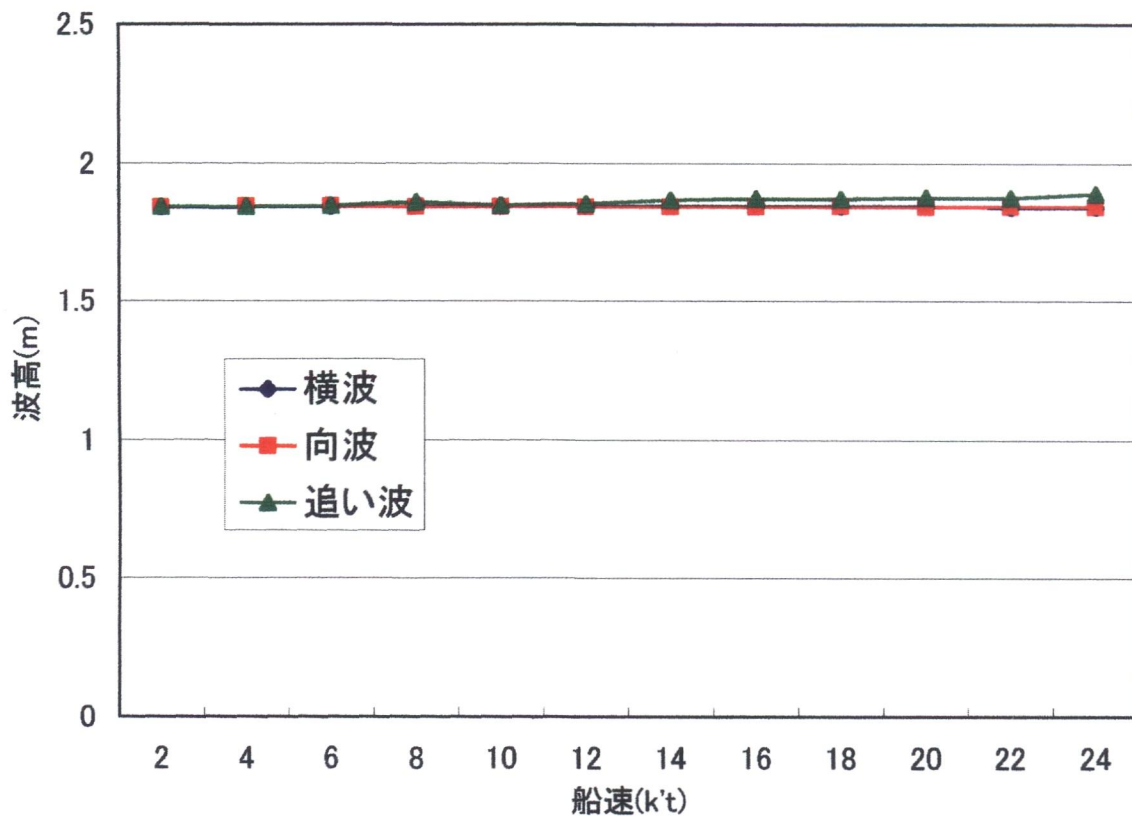


図 4.16 表示有義波高

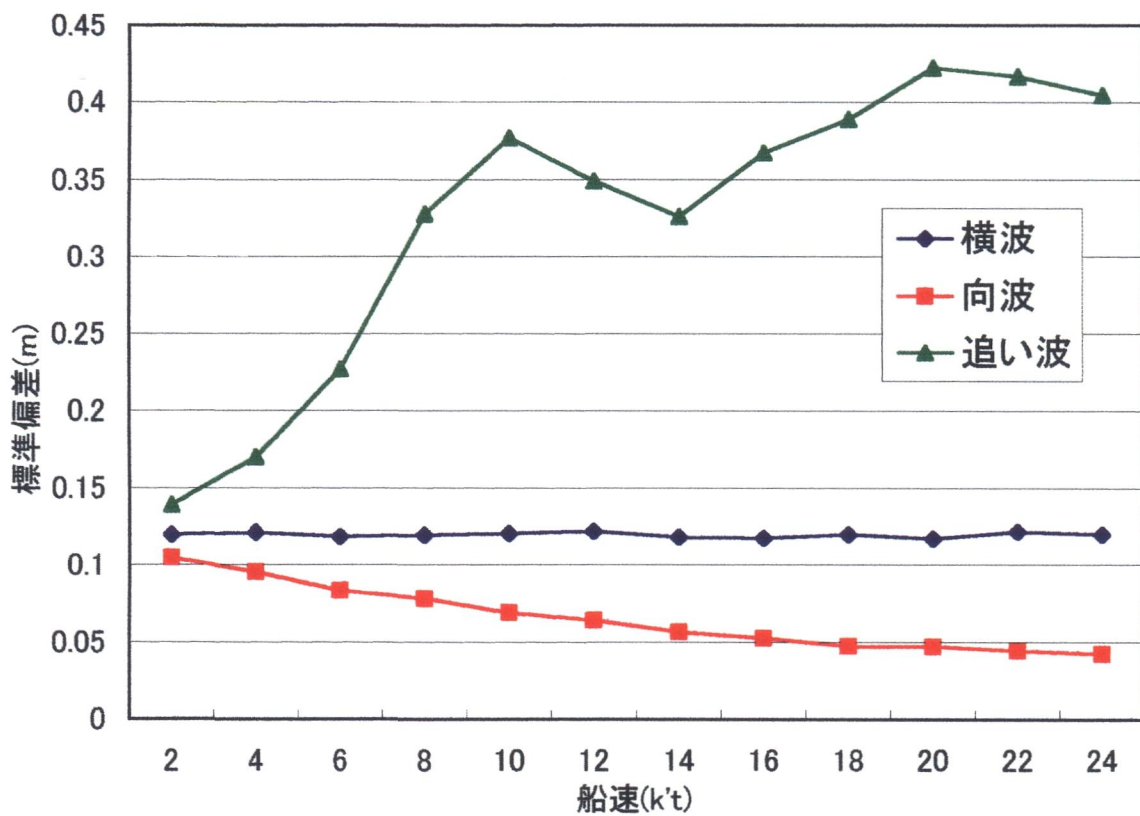


図 4.17 表示有義波高の標準偏差

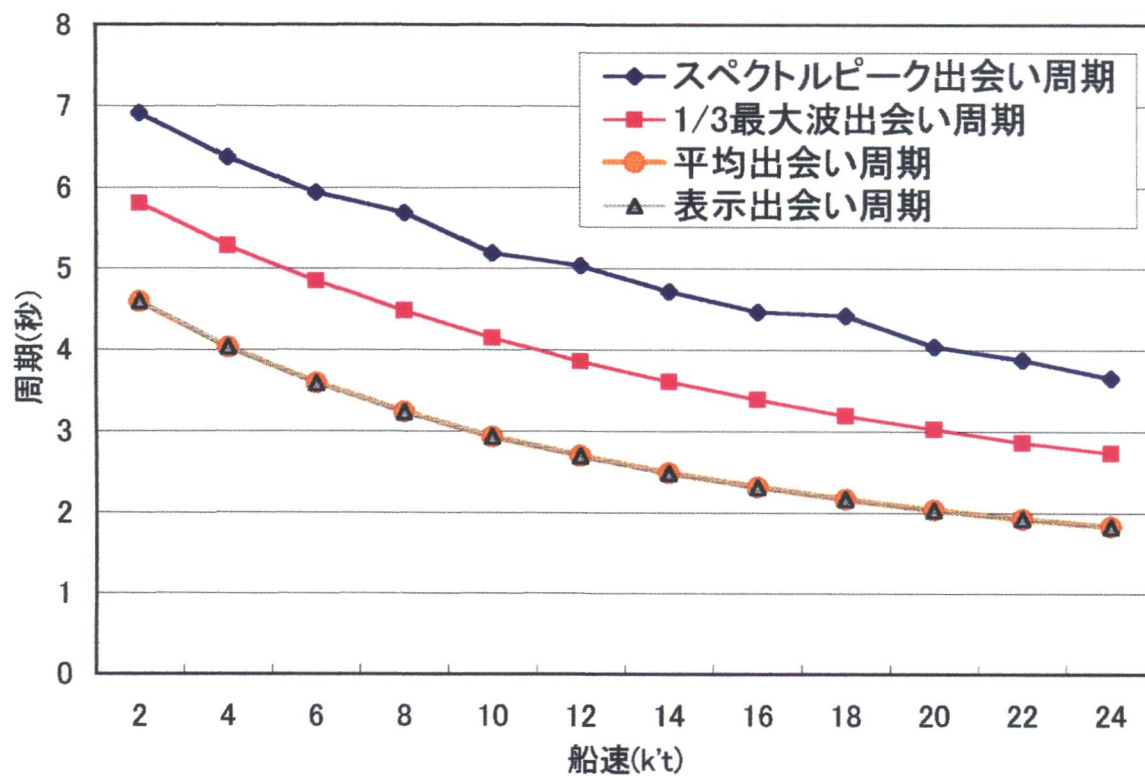


図 4.18 向波における3種類四つの出会い周期

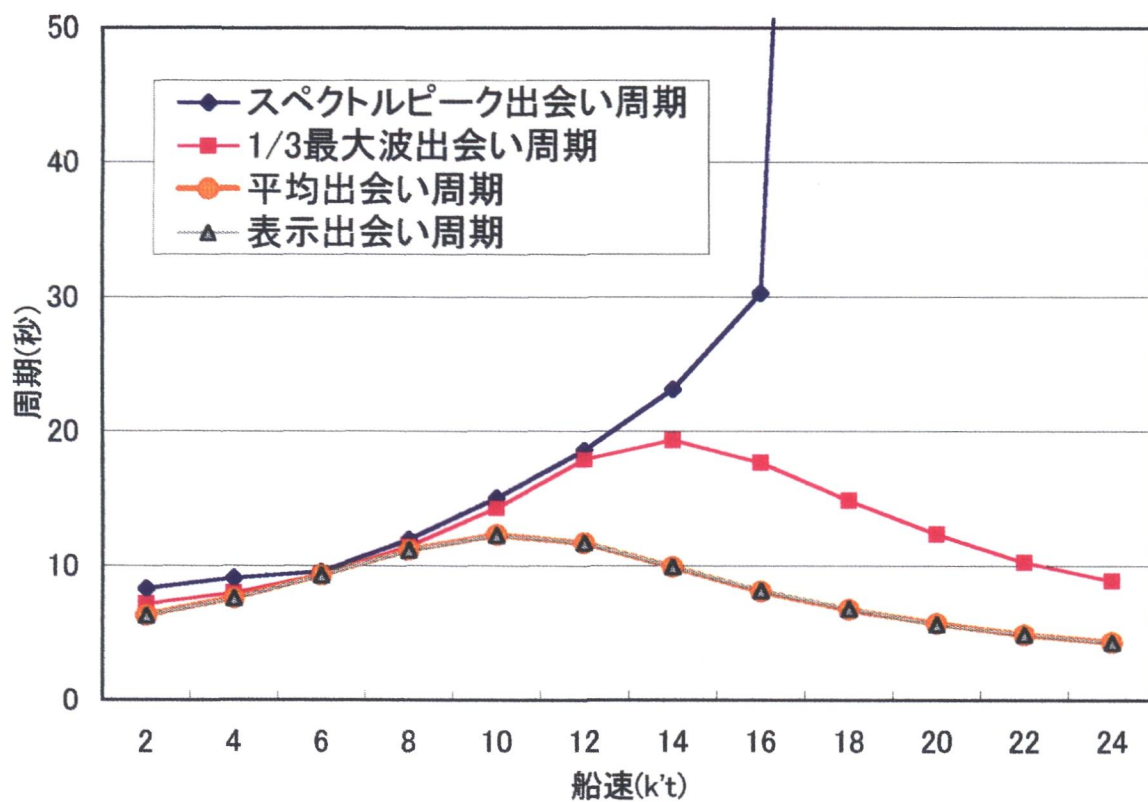


図 4.19 追い波における3種類四つの出会い周期



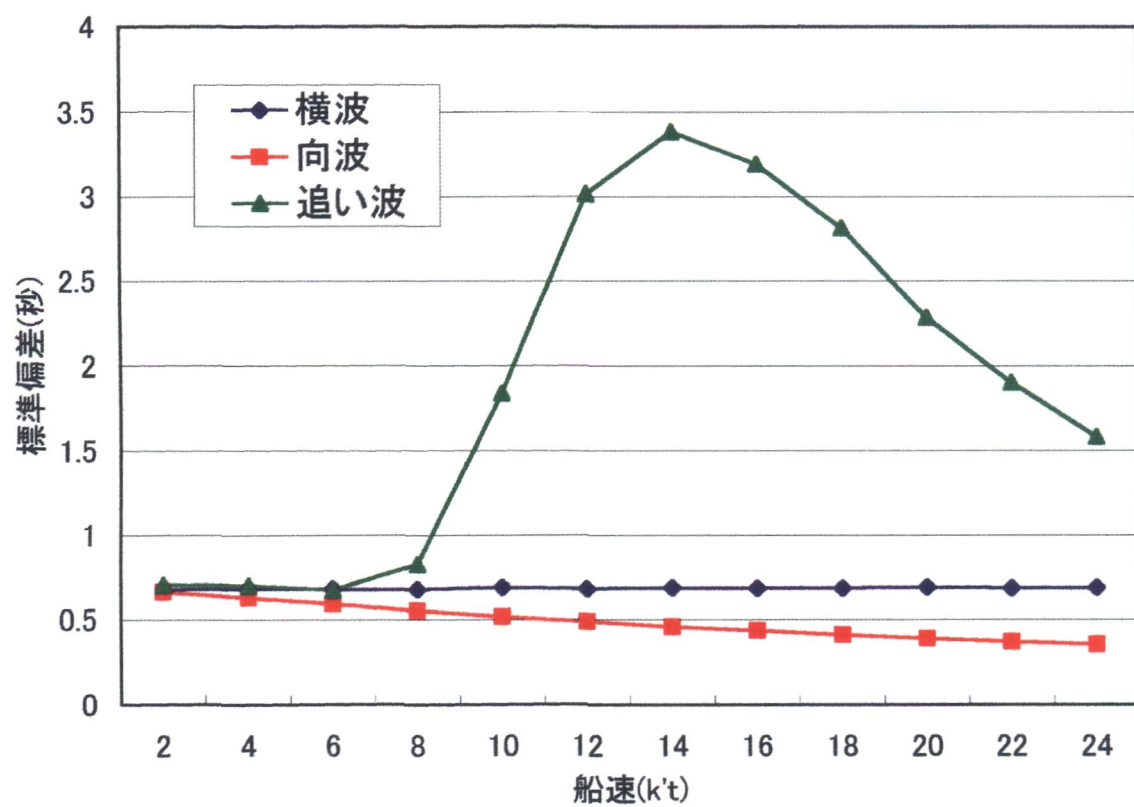


図 4.20 表示出会い周期の標準偏差

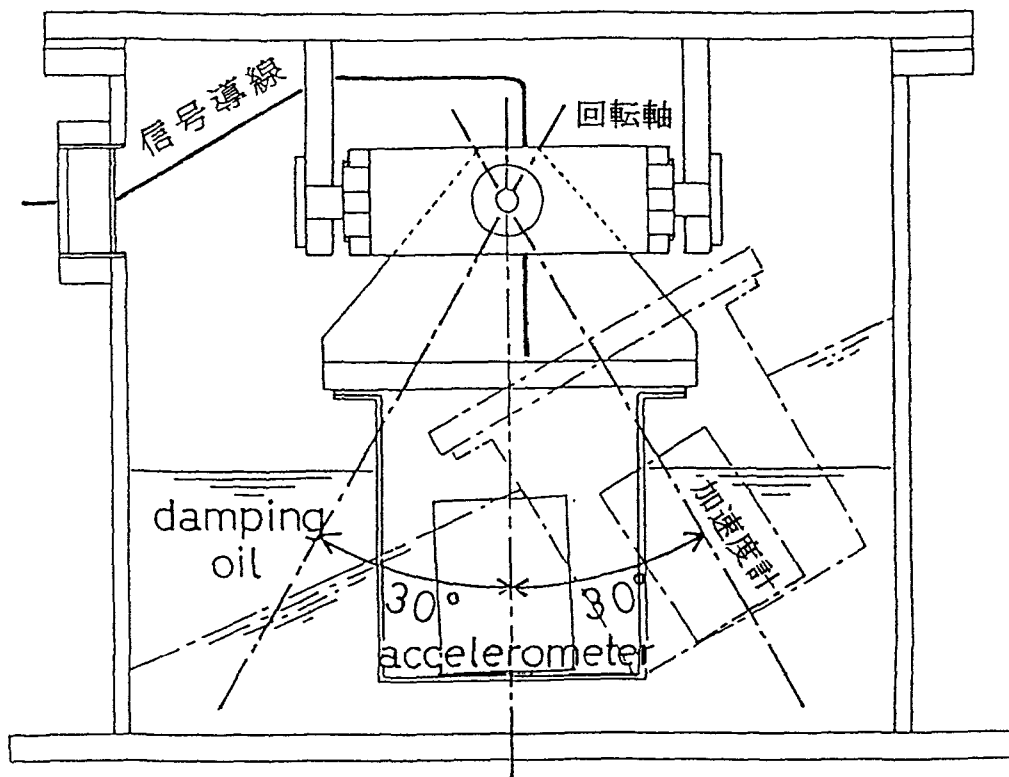


図 4.21 振り子型ジンバル装置の概観

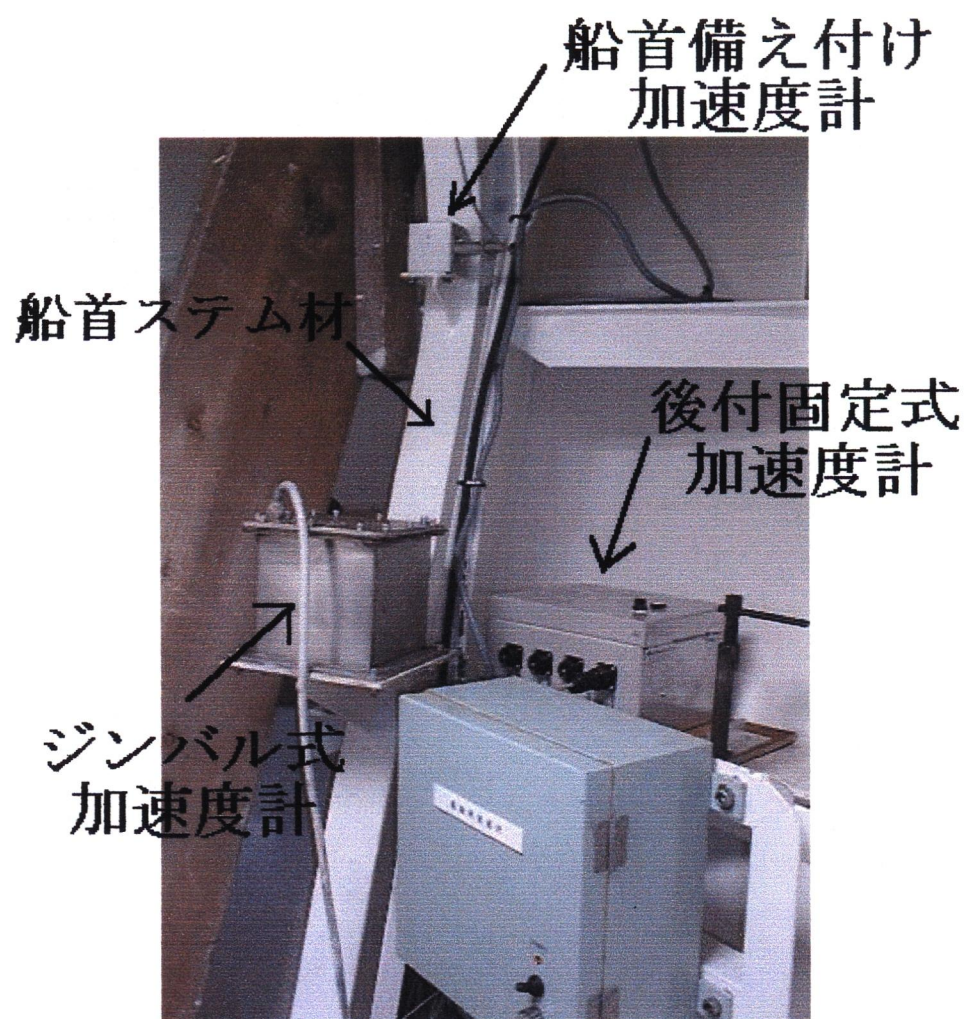


図 4.22 船首加速度計の設置位置

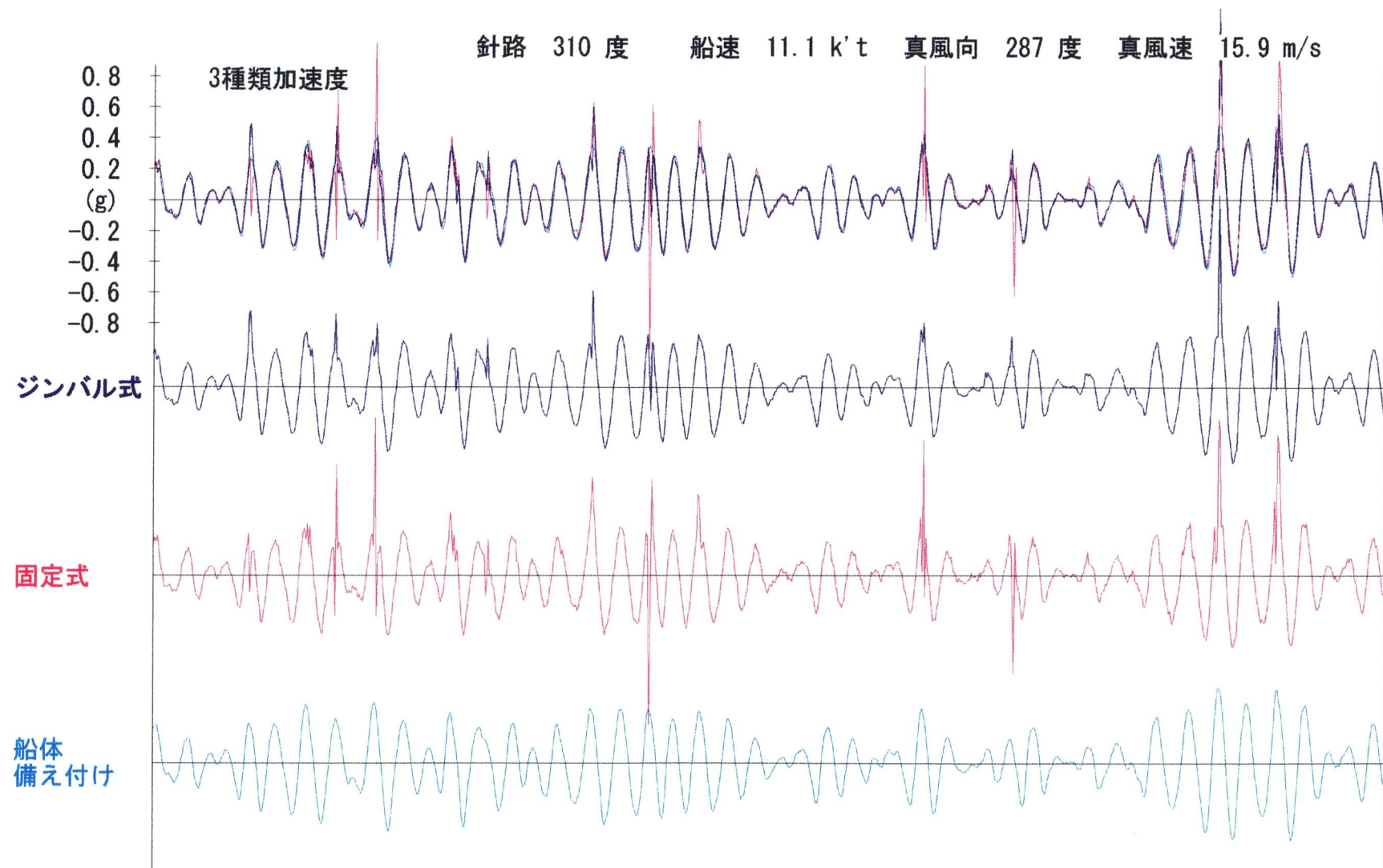


図 4.23 3種類の加速度時系列の一例 [ ユニット番号 11 ]

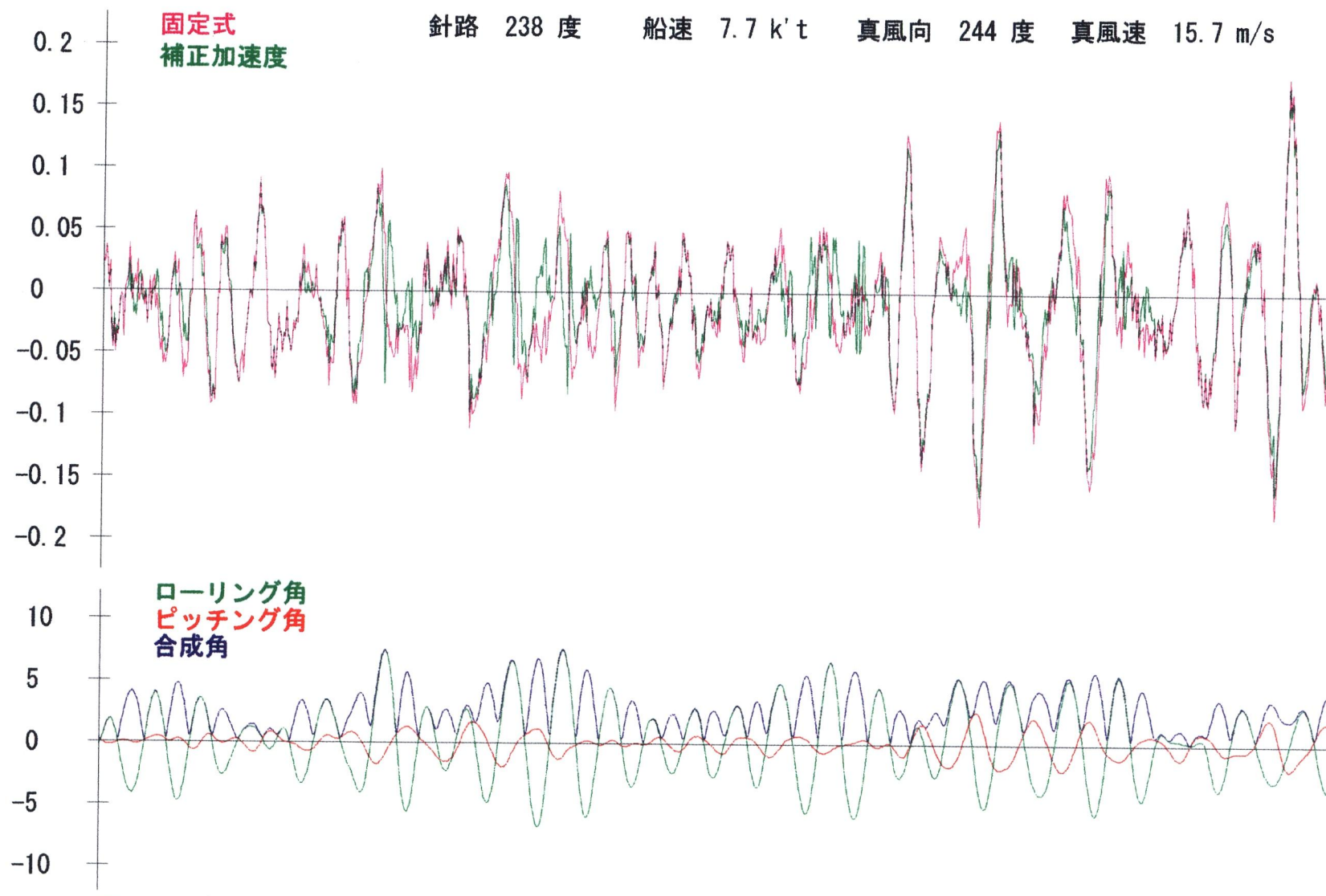


図 4.24 補正後の加速度の一例 [ ユニット番号 01 ]



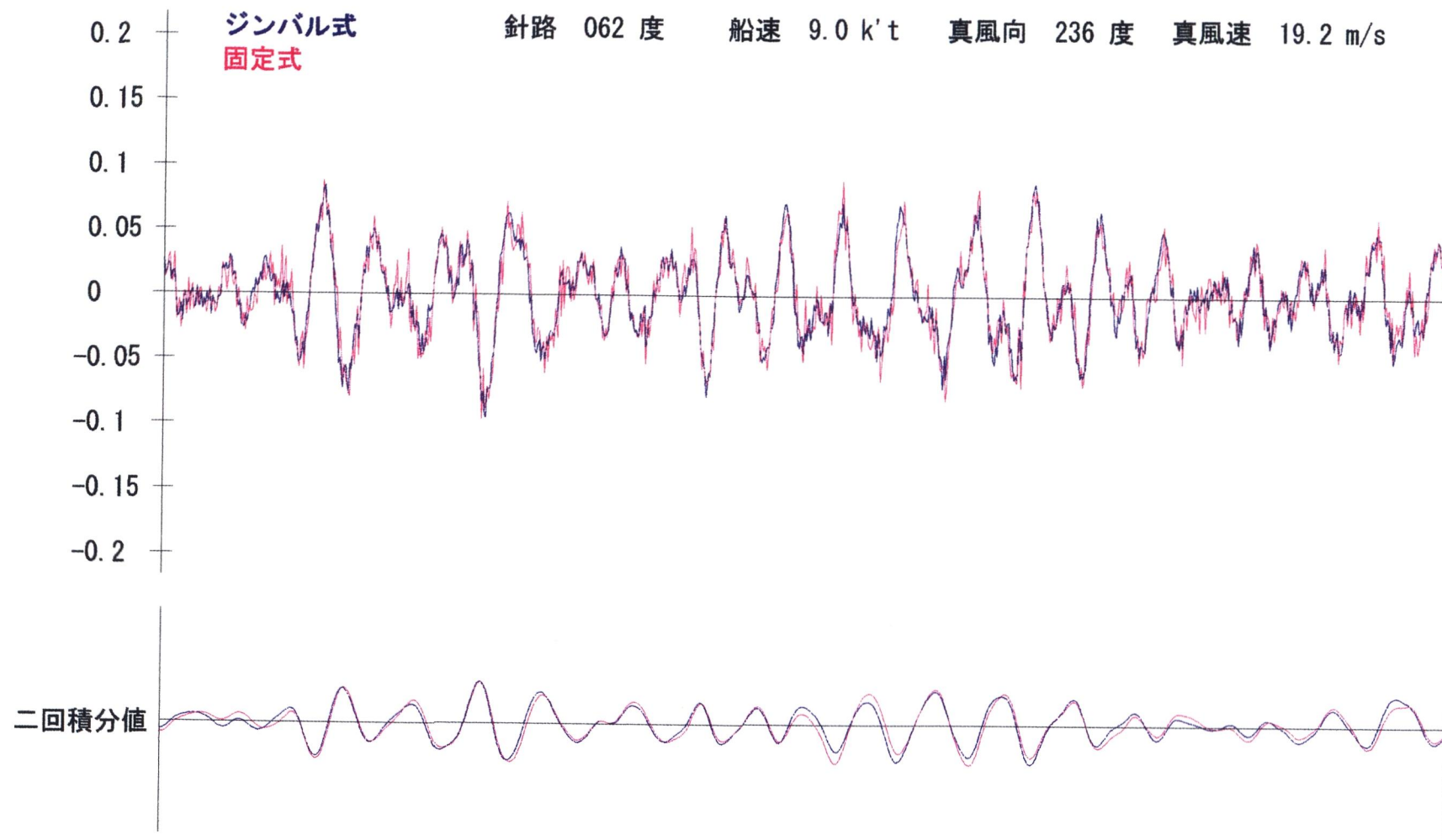
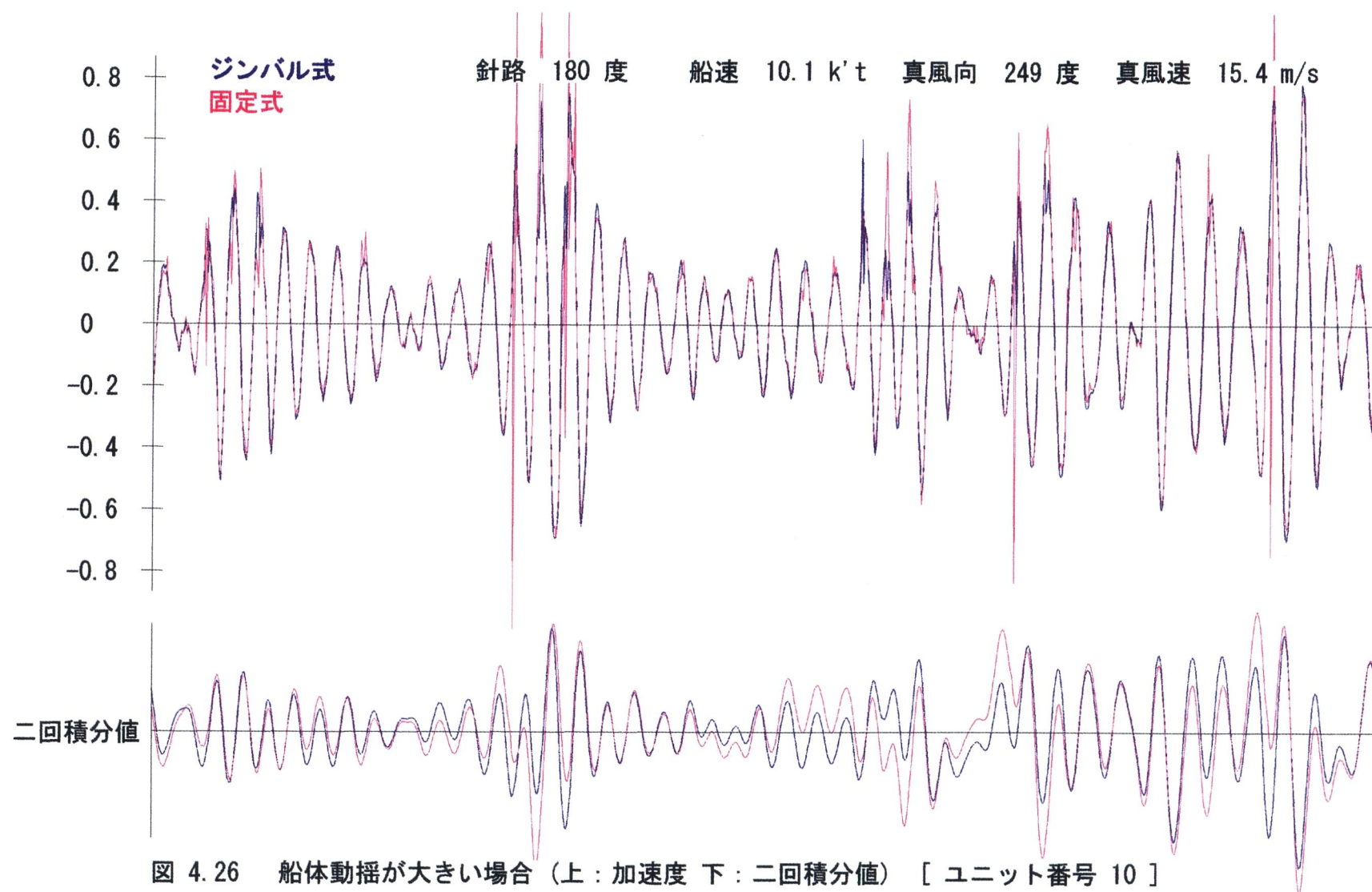


図 4.25 船体動揺が小さい場合（上：加速度 下：二回積分値） [ ユニット番号 04 ]



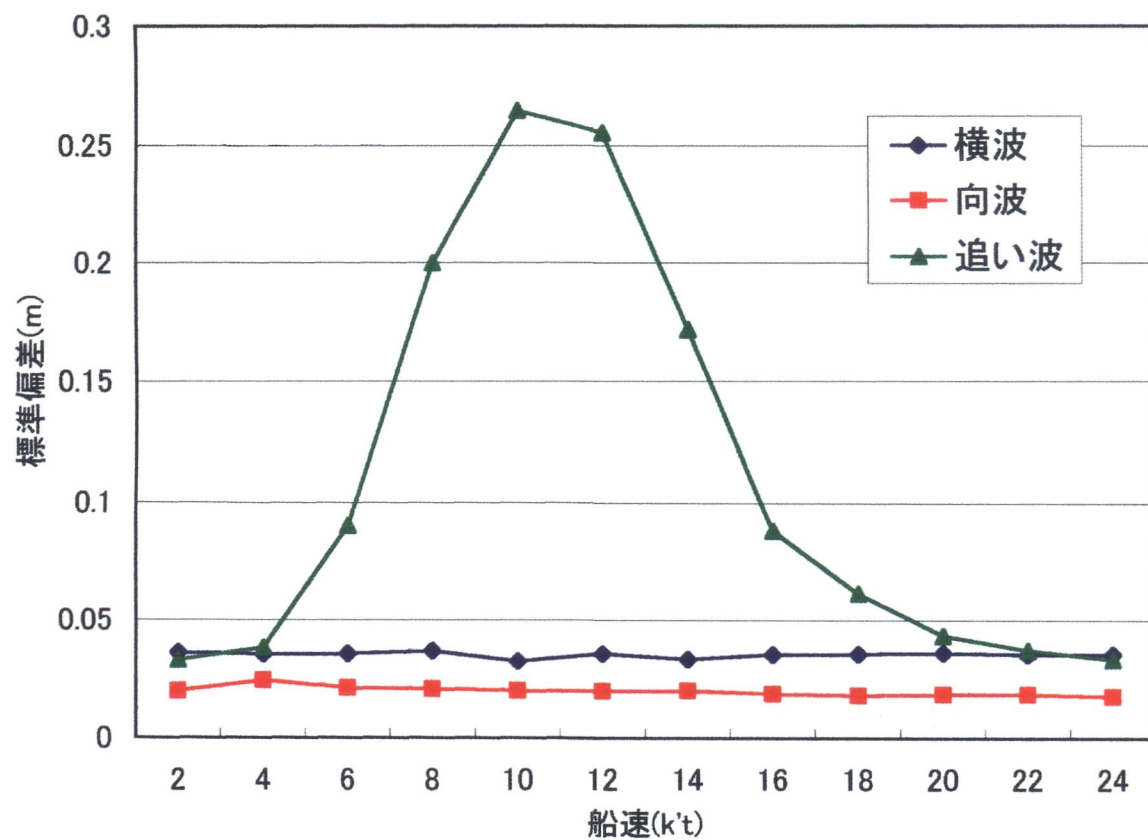


図 5.1 ゼロアップクロス法による有義波高(1/3最大波高)の300回における標準偏差



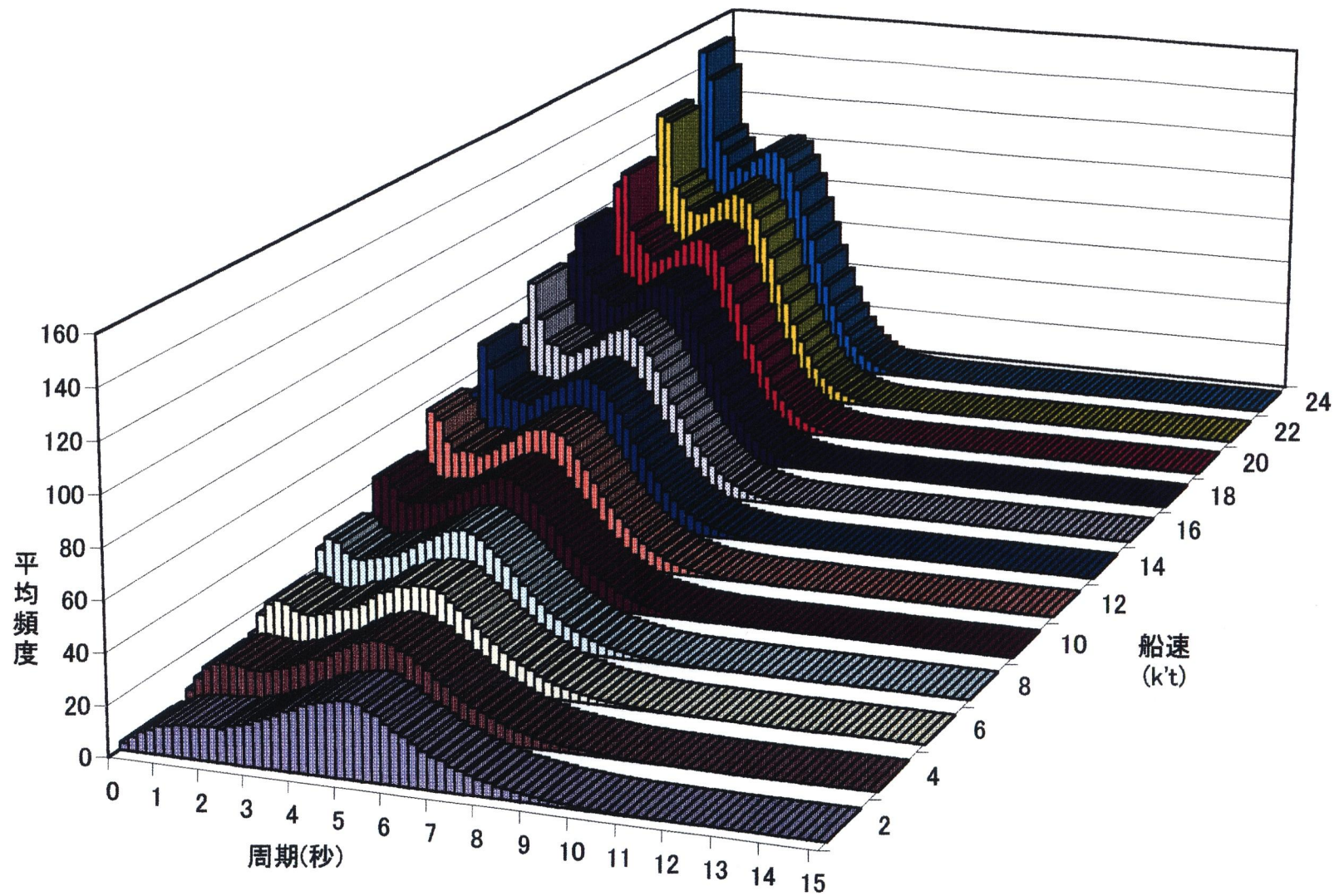


図 5.2 向波における船速毎のゼロアップクロス法での平均周期頻度

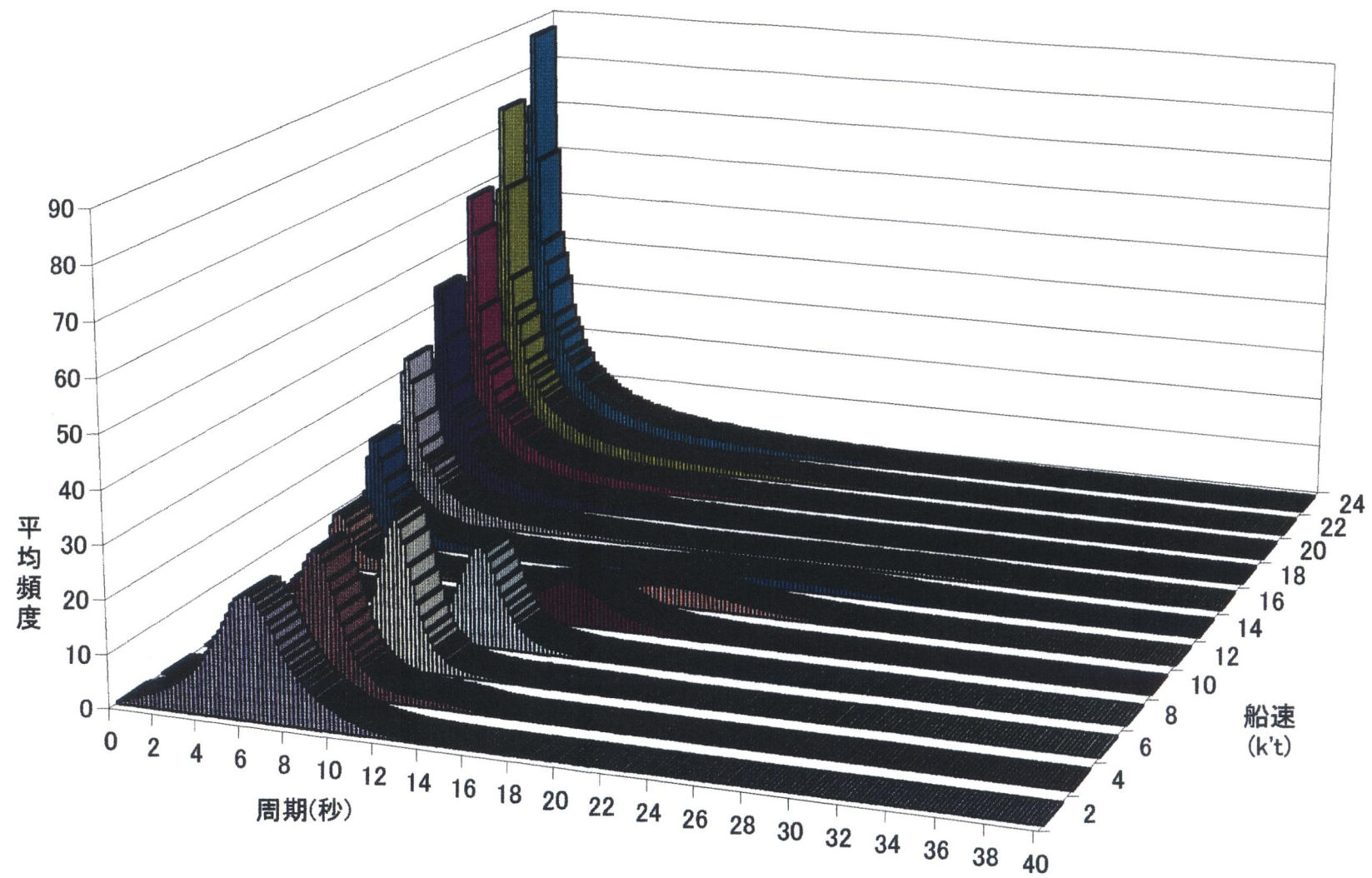


図 5.3 追い波における船速毎のゼロアップクロス法での平均周期頻度

固定金具

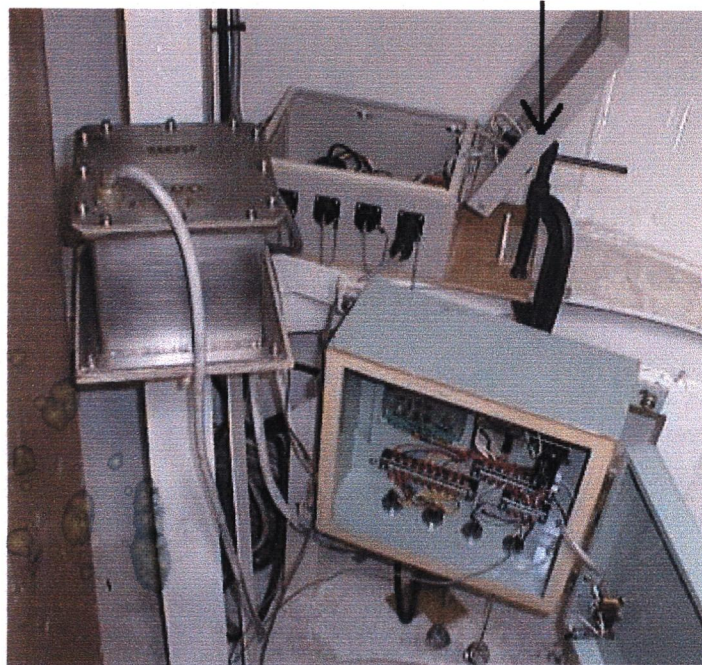


図 5.4 後付け固定式加速度計の設置方法